



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



Tesis para optar el Título de  
Magister en Ingeniería de la Energía

---

# **Análisis del Consumo y Generación de Agua Caliente Sanitaria en el Sector Residencial Uruguayo**

---

Autor: Ing. Luis de Saldamando

Directores de Tesis: Dr. Italo Bove  
Mag. Ernesto Elenter

Montevideo, Uruguay

2018



## Resumen Ejecutivo

El calentamiento de agua sanitaria es responsable de una porción significativa del consumo de energía en el sector residencial. A nivel global es responsable de alrededor del 4 a 5% del consumo total de energía, por lo que parece un rubro relevante a considerar cuando se busca mejorar la eficiencia energética. Como se puede ver en la Figura I, Uruguay es un caso particular ya que la mayoría de los hogares cuenta con sistemas eléctricos con almacenamiento. En contraste, se puede observar que en países como USA, Canadá, Europa y Australia los equipos a gas se encuentran más difundidos.

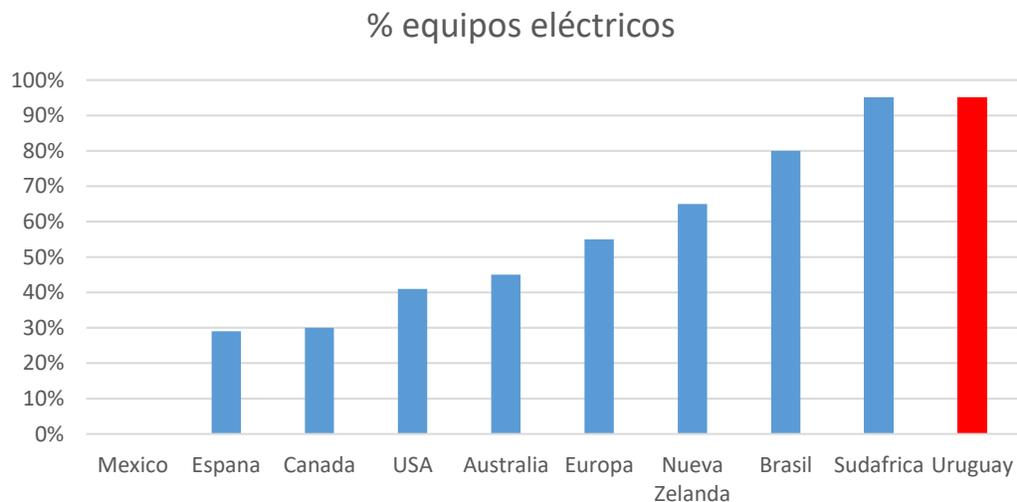


Figura I. Porcentaje de equipos eléctricos para el calentamiento de agua en los distintos países.

El consumo de agua caliente es complejo ya que engloba un gran espectro de usuarios y aplicaciones que presentan alta variabilidad. En Uruguay no existen datos estadísticos de consumo de agua caliente sanitaria, por lo que se utilizaron distribuciones de probabilidad y valores de consumo medidos en otros países para generar los perfiles de consumo para cada día del año. En primer lugar se definió un escenario base hipotético debido a que no existe información de los equipos que se encuentran instalados en plaza. Este escenario se consideró como un calefón de eficiencia B. La tarifa aplicable al escenario base es la más difundida en el sector residencial que es la residencial simple. Luego dentro de los sistemas existentes para el calentamiento de agua se estudiaron, los Calefones eficiencia A, las bombas de calor, los equipos a gas instantáneos y con almacenamiento y los Calentadores Solares de Agua. Para los equipos eléctricos se consideraron 2 tarifas, la tarifa residencial simple que presenta un costo homogéneo a lo largo del día y la tarifa residencial doble horario que considera distinto precio a lo largo del día. Para los equipos a gas también se consideraron 2 tarifas, gas natural y gas licuado de petróleo.

En este estudio se evaluó y comparo, a lo largo del año, las distintas alternativas comentadas y luego se analizaron los resultados económicos desde el punto de vista del usuario y el efecto que las distintas alternativas pueden tener a nivel país. Por último, también se analizó el efecto ambiental que presenta un cambio de tecnologías a través de las emisiones de gases de efecto invernadero. Primero se generó

el perfil de consumo en base a distribuciones de probabilidad para cada uso modelado (ducha, piletas y lavado de platos). Luego con los datos de temperatura ambiente, velocidad del viento e Irradiación se determinó la temperatura del agua de entrada y con ella el consumo de agua caliente del hogar a lo largo del año y el aporte del CSA modelándolo en base a Especificaciones Técnicas Uruguayas de Instalaciones Solares Térmicas. Luego para realizar la comparativa se obtuvo para cada alternativa el consumo energético con y sin CSA para luego utilizando las tarifas obtener un costo en pesos por mes. Con esta información se obtuvo el ahorro anual que se logra con cada alternativa al restar al costo anual del escenario base, el costo anual que presenta la alternativa y con los valores de inversión y mantenimiento se compararon las alternativas en base a tres indicadores económicos; el Periodo de Repago Simple, la Tasa Interna de Retorno y el Valor Presente Neto.

Manteniendo las condiciones fijas se realizaron 500 corridas para evaluar la variabilidad, a las cuales se aplicó el test de Shapiro-Wilk donde se confirmó que la distribución es normal y todos los valores anuales presentan una desviación estándar menor al 5% del promedio. Luego se determinó la variabilidad anual en energía al variar la cantidad de integrantes en el hogar y el perfil de consumo de los integrantes.

De los resultados del trabajo presentados en las Figuras II y III en consumo energético y costo anuales para un hogar de 3 integrantes, se puede concluir que desde el punto de vista de consumo energético las alternativas con CSA son las que presentan un menor consumo energético pero cuando se observan los indicadores económicos se puede ver que estos sistemas ya no son tan atractivos debido principalmente a su alto costo de inversión. Luego le siguen la bomba de calor y los sistemas a gas instantáneos donde su ventaja radica en si el hogar presenta un bajo consumo o no. Los sistemas a gas instantáneos presentan los mejores valores tanto energéticos como económicos para consumos más pequeños ya que al no almacenar no cuentan con estas pérdidas. En cambio, al aumentar el consumo de agua las bombas de calor se presentan como una opción mejor debido a que presentan una mejor eficiencia y más aún cuando se utiliza una tarifa doble horario. Por último se destaca que un Calefón eficiencia A con una tarifa doble horario sería una opción de muy bajo costo de inversión que puede presentar ahorros considerables en comparación con el escenario base. Se debe mencionar que la ventaja que si presentan únicamente los CSA es que el costo de inversión es más fácil de conocer que el costo de los energéticos en el tiempo por lo cual una vez que se compra el equipo el costo de operación normal es fijo e igual a 0 ya que el sol no presenta un costo y en cambio la energía eléctrica y el gas si van a variar sus precios en el tiempo y no pueden calcularse de una forma certera.

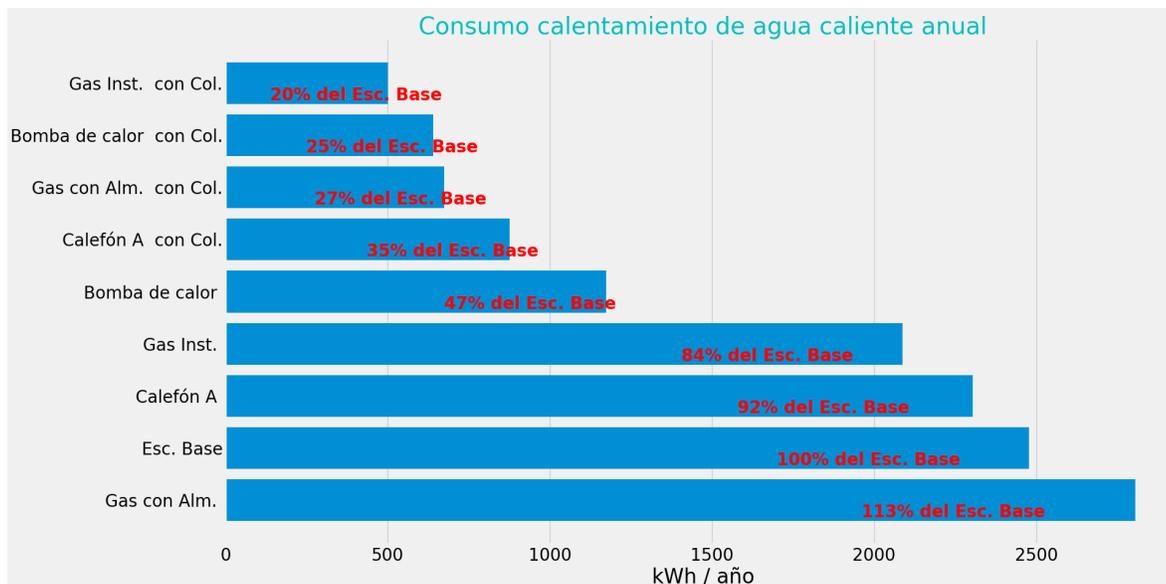


Figura II. Consumo anual de energía para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas.

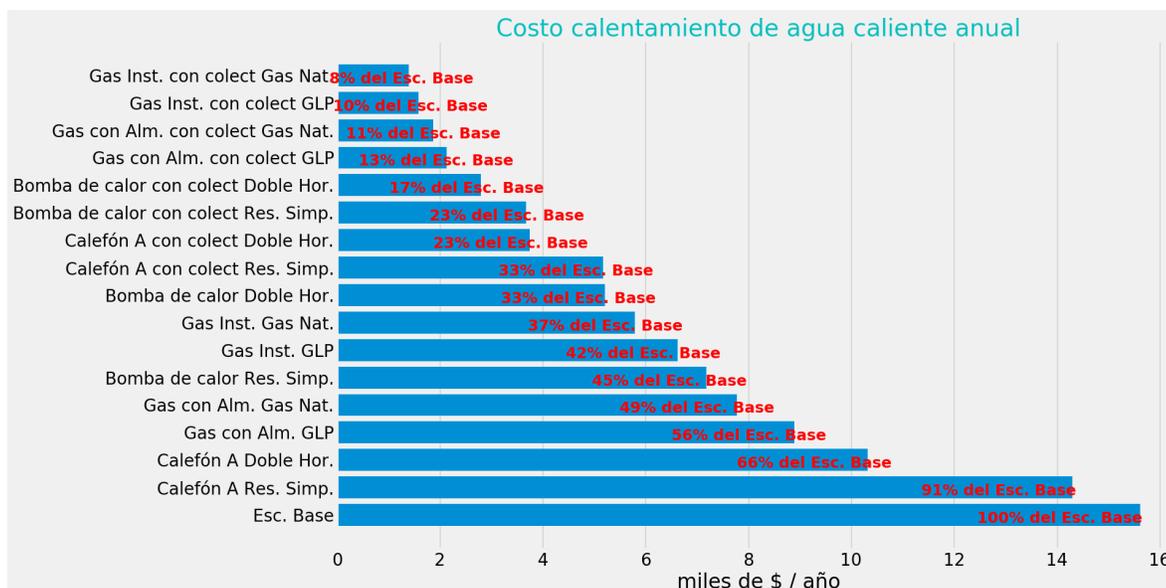


Figura III. Costo anual para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta las distintas tarifas y el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas.

Luego, se puede observar que un cambio de alrededor del 50% de los hogares por Bomba de calor podría llegar a mitigar el aumento de la demanda que ocurre de un año a otro. Un cambio del 25% de los equipos a Gas Natural implicaría casi duplicar la cantidad de Gas Natural que se importa hoy en día mientras que solamente implicaría aumentar la cantidad de GLP consumido casi un 20%. En cuanto a las emisiones incluso un cambio en el 75% de los equipos en el peor de los casos conllevaría un aumento de las emisiones menor al 5%. Ni la capacidad de envasado para el caso del GLP ni el gasoducto Cruz del Sur

que trae el Gas Natural de Argentina a Uruguay presentarían una restricción a un posible aumento del consumo.

## Índice

Resumen Ejecutivo .....	1
Abreviaturas .....	8
Índice de Figuras.....	10
Índice de Tablas .....	12
1. INTRODUCCIÓN .....	15
2. DEMANDA DE AGUA CALIENTE RESIDENCIAL .....	19
2.1. Calentamiento de agua sanitaria en el mundo .....	19
2.2. Calentamiento de agua del sector residencial en Uruguay.....	25
2.3. Relevancia del tema para Uruguay.....	28
2.4. Consumo y almacenamiento de agua caliente.....	30
2.5. Perfiles de consumo de agua caliente residencial.....	32
3. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA .....	35
3.1. Calentadores a gas.....	35
3.1.1. Sistemas a gas con almacenamiento.....	35
3.1.2. Sistemas a gas sin almacenamiento .....	36
3.1.3. Sistemas a gas con almacenamiento y condensación .....	38
3.2. Sistemas eléctricos con resistencia con almacenamiento .....	39
3.3. Sistemas eléctricos con resistencia sin almacenamiento.....	40
3.4. Sistemas eléctricos con bomba de calor .....	41
3.5. Calentadores Solares de Agua .....	47
4. PERFORMANCE Y COSTO .....	53
4.1. Performance .....	53
4.2. Payback.....	54
4.3. Costos .....	55
4.4. Vida útil.....	56
4.5. Eficiencias .....	57
4.6. Decisión de compra .....	58

5.	ENERGÉTICOS .....	61
5.1.	Energía eléctrica .....	61
5.1.1.	Tarifas de energía eléctrica .....	62
5.2.	Gas Natural y Gas licuado de petróleo .....	64
5.2.1.	Tarifas de gas .....	65
5.3.	Incentivos y Normativas Internacionales .....	65
5.4.	Incentivos y Normativas en Uruguay.....	70
6.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	75
6.1.	Usos de agua caliente y generación de sus eventos .....	75
6.2.	Información climatológica .....	80
6.3.	Temperatura del agua de entrada a la vivienda.....	81
6.4.	Temperatura de almacenamiento del agua caliente .....	82
6.5.	Demanda total de agua del calentador .....	83
6.6.	Calentador Solar de Agua .....	86
6.7.	Sistemas considerados .....	89
6.8.	Tarifas .....	95
6.9.	Comparación económica .....	96
6.10.	Estudio de la variabilidad del modelo .....	99
6.11.	Estudio de la incidencia de los integrantes y los perfiles de consumo .....	99
6.12.	Simulación en Python .....	100
6.13.	Simulación de escenarios de cambio de tecnología.....	100
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	101
7.1.	Variabilidad del modelo.....	101
7.2.	Hogar con 3 integrantes .....	102
7.3.	Incidencia de los integrantes y los perfiles de consumo en el consumo de agua caliente .....	114
7.4.	Simulación de escenarios de cambio de tecnología.....	117
8.	CONCLUSIÓN Y POSIBLES DIRECCIONES DE FUTURAS INVESTIGACIONES.....	122
9.	BIBLIOGRAFÍA: .....	125

ANEXO I..... 132

## Abreviaturas

ACS - Agua Caliente Sanitaria

ANCAP - Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland

CSA – Calentador Solar de Agua (Solar Water Heating System)

COP - Coefficient of Performance

DOE - Department of Energy (USA)

DOY – Day of Year

EE - Energía Eléctrica

EF - Energy Factor

ETUS - Especificaciones Técnicas Uruguayas de Instalaciones Solares Térmicas

FHR - First Hour Rate

GHG - Green House Gases

GLP - Gas Licuado de Petróleo

GWh - Giga Watt hora

GWth - Giga Watt thermal

ICS - Integral Collector Storage

IRENA - International Renewable Energy Agency

IVA - Impuesto al Valor Agregado

L - Litro

LES - Laboratorio de Energía Solar

LPM - Litros por minuto

MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería

NREL - National Renewable Energy Laboratory (USA)

SPF - Seasonal Performance Factor

TIR - Tasa Interna de Retorno

URSEA - Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua

USA – United States of America

USD - United States Dollar

UTE - Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas

## Índice de Figuras

Figura 1. Producción de energía para calentamiento a nivel mundial discriminada por fuente y por sector de consumo [67].	20
Figura 2. Grafica del consumo energético Uruguayo por sector (Elaboración propia a partir del Balance energético Nacional [20, 37]).	25
Figura 3. Evolución del consumo final total del Sector Residencial. Los porcentajes representan el aumento respecto al año anterior (Elaboración propia a partir del Balance energético Nacional [20, 37]).	26
Figura 4. Porcentaje de equipos eléctricos para el calentamiento de agua en los distintos países (Elaboración propia en base a la información presentada en este capítulo).	28
Figura 5. Porcentajes de hogares con Calefones (izquierda) y calentadores instantáneos (derecha) por departamento para el año 2012 [21].	29
Figura 6. Ejemplos de objetivo de un estudio vs las características de la demanda necesarias a considerar [29].	31
Figura 7. Perfiles promedio de consumo de ACS a lo largo del día (arriba) y consumo de ACS per cápita a lo largo del año (debajo) [80].	33
Figura 8. Esquema de sistema a gas con almacenamiento [32].	36
Figura 9. Esquema de sistema a gas sin almacenamiento (instantáneo) [32].	37
Figura 10. Esquema de sistema a gas con condensación y con almacenamiento [32].	38
Figura 11. Esquema de sistema eléctrico con almacenamiento [32].	39
Figura 12. Esquema de sistema eléctrico con almacenamiento [32].	40
Figura 13. Diagrama temperatura entropía que muestra el ciclo de ideal de una bomba de calor [60].	42
Figura 14. Esquema de sistema eléctrico con bomba de calor [32, 69, 71].	45
Figura 15. Esquema de un colector de placa plana típico [28].	48
Figura 16. Esquema de un tubo evacuado típico [28].	48
Figura 17. Curva de aceptación residencial vs payback para tecnologías ambientales [24].	54
Figura 18. Costos típicos de instalación en USA [25].	55
Figura 19. Motivadores de las compras de calentadores de agua en USA [24].	59
Figura 20. Requisitos de eficiencia para calentadores de agua con almacenamiento a gas [24].	67
Figura 21. Requisitos de eficiencia para calentadores de agua con almacenamiento eléctricos [24].	68
Figura 22. Requisitos de eficiencia para calentadores de agua sin almacenamiento a gas [24].	68
Figura 23. Variación de consumo del Sector Residencial, por fuente de energía, en el Escenario de Eficiencia Energética de acuerdo al Plan Nacional de Eficiencia Energética [23].	71
Figura 24. Distribuciones de probabilidad de ocurrencia a lo largo del día para ducha, canilla y lavado de platos (Elaboración propia en base a los datos de [3, 29, 52]).	76
Figura 25. Esquema de la iteración de las pérdidas en la cañería hacia el consumo de piletas y duchas (Elaboración propia).	85
Figura 26. Esquema de la iteración de las pérdidas en la cañería hacia sistema de respaldo y cuerpo de tanque de almacenamiento (Elaboración propia).	89
Figura 27. Gráfica de pérdidas de los calentadores en función de su volumen de acuerdo a la norma UNIT 1157:2011, 3ra revisión (Elaboración propia).	92
Figura 28. COP promedio de calentamiento para bombas de calor utilizando aire y tierra como fuente de calor (izquierda y derecha respectivamente) [60].	93
Figura 29. Esquema de los pasos principales seguidos en la simulación (Elaboración propia).	100
Figura 30. Demanda de agua caliente a lo largo del año para un hogar de 3 personas.	102

Figura 31. Demanda de agua caliente hora a hora para un día aleatorio del año para un hogar de 3 personas. ....	103
Figura 32. Rendimiento (COP) de la bomba de calor a lo largo del año.....	105
Figura 33. Rendimiento del colector diario a lo largo del año.....	105
Figura 34. Consumo energético diario para cada una de las alternativas consideradas a lo largo del año para un hogar de 3 personas. ....	106
Figura 35. Consumo energético mensual para cada una de las alternativas consideradas a lo largo del año para un hogar de 3 personas. ....	107
Figura 36. Costo mensual para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta las distintas tarifas y el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas. ....	108
Figura 37. Consumo anual de energía para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas. ....	109
Figura 38. Costo anual para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta las distintas tarifas y el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas. ....	110
Figura 39. Payback y TIR de las alternativas con y sin CSA para cada tarifa.....	111
Figura 40. Ahorro versus inversión para equipos con tarifas doble horario y con GLP. ....	112
Figura 41. Valor Presente Neto de las distintas alternativas considerando una tasa de 10%. ....	113
Figura 42. Comparación de consumos de energía anual para cada alternativa considerando distinta cantidad de integrantes en el hogar. ....	115
Figura 43. Comparación de consumos de energía anual para cada alternativa considerando distinto consumo para un hogar de 3 integrantes. ....	116
Figura 44. Demanda de Energía Eléctrica y crecimiento del PBI en el periodo 2008 – 2016 [62].....	118

## Índice de Tablas

Tabla 1. Consumo energético Uruguayo por sector [1, 20].....	25
Tabla 2. Participación del calentamiento de agua en cada uno de los Energéticos en el sector residencial (2006) [2]. .....	26
Tabla 3. Participación de los Energéticos en el calentamiento de agua en el sector residencial (2006) [2].....	27
Tabla 4. Rendimientos de utilización por fuentes para el calentamiento de agua en el sector residencial (2006) [2]. .....	27
Tabla 5. Consumo de energía residencial y para el calentamiento de agua en el mundo (Elaboración propia en base a la información presentada en este capítulo).....	28
Tabla 6. Porcentajes de hogares con Calefones y calentadores instantáneos por año (Elaboración propia a partir de [21]).	29
Tabla 7. Costos aproximados en USA para los distintos sistemas [28].....	56
Tabla 8. Vida útil promedio en Brasil para los distintos sistemas [15].	56
Tabla 9. Vida útil promedio en USA para los distintos sistemas [28].	57
Tabla 10. Eficiencias promedio en Brasil de los equipos [15].....	57
Tabla 11. EFs mínimos permitidos para los equipos certificados Energy Star [16].	58
Tabla 12. EFs típicos en USA para los distintos sistemas [28].	58
Tabla 13. Distribución del consumo residencial y su participación en el consumo total del país (Elaboración propia en base a los datos obtenidos de [38]).	61
Tabla 14. Distribución de los servicios activos residenciales (Elaboración propia en base a los datos obtenidos de [38]).	61
Tabla 15. Distribución de la Energía Eléctrica vendida en el año (Elaboración propia en base a los datos obtenidos de [38]).	61
Tabla 16. Composición típica del Gas Natural [41].....	64
Tabla 17. Consumo a nivel país y participación en el sector residencial de Gas Natural y GLP (Elaboración propia en base a [20, 37]).	65
Tabla 18. Criterios Energy Star para calentadores de agua [25].	66
Tabla 19. Estándares federales para calentadores de agua efectivos a partir de abril de 2015 para USA [24].....	67
Tabla 20. Consumos diarios de acuerdo al NREL para un hogar con 3 personas (Elaboración propia en base a los datos de [3, 29, 52]).....	78
Tabla 21. Cantidad de eventos por día por persona para los 3 usos considerados (ducha, pileta, lavado de platos).	79
Tabla 22. Litros per cápita por día reportados en la bibliografía en comparación con los posibles obtenidos en la simulación [80].	80
Tabla 23. Temperatura ambiente promedio mensual e Irradiación diaria promedio mensual en un plano de 45 grados para Montevideo.	81
Tabla 24. Valores de temperatura del agua de entrada a lo largo del año.	82
Tabla 25. Etiquetado energético de acuerdo a la Norma UNIT 1157:2011, 3ra revisión.....	90
Tabla 26. EFs mínimos permitidos para los equipos a gas certificados Energy Star [16].	94
Tabla 27. Costos de inversión y de mantenimiento anuales para las distintas alternativas consideradas (Elaboración propia).	96
Tabla 28. Descripción de las operaciones de mantenimiento preventivo que deben realizarse [55].	97
Tabla 29. Desviación estándar como porcentaje del promedio de las 500 corridas sucesivas del modelo en kWh/año y \$/ año para un hogar de 3 personas.....	101

Tabla 30. Demanda de agua caliente y tibia hora a hora para un día aleatorio del año para un hogar de 3 personas. .....	104
Tabla 31. Promedio de consumo anual en kWh para un hogar de 3 personas.....	117
Tabla 32. Consumos energéticos de Gas Natural, GLP y Energía Eléctrica de Uruguay en el año 2016. ....	117
Tabla 33. Resultados del cambio de distintos porcentajes de los hogares por Bomba de calor y Calefones A.....	118
Tabla 34. Resultados del cambio de distintos porcentajes de los hogares por sistemas a Gas Instantáneo y con Almacenamiento. ....	119
Tabla 35. Resultados de las emisiones al realizar cambios de distintos porcentajes de los hogares por sistemas a Gas Instantáneo y con Almacenamiento.....	120
Tabla 36. Ahorro anual del total de los usuarios en millones de USD para los 3 escenarios de porcentaje de cambio de tecnología (alternativas más atractivas económicamente para los usuarios). ....	121
Tabla 37. Ahorro anual del total de los usuarios en millones de USD para los escenarios de calefón Eficiencia A con CSA.....	121



## 1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento de agua consiste en elevar la temperatura del agua sanitaria (que usualmente ingresa a los hogares a una temperatura parecida a la ambiente) para utilizarla en la limpieza del hogar y la higiene personal. Se realiza principalmente con calentadores, calefones, etc.; pudiendo utilizarse también cocinas, primus u otros artefactos que produzcan calor. No se incluye en este uso el calentamiento de agua para la cocción de alimentos, el té o el mate [2].

Un calentador de agua es un dispositivo o un set de dispositivos equipado con un generador de calor y conectado a una fuente externa de agua sanitaria, que puede entregar agua a un caudal y temperatura deseados. Este dispositivo puede o no contar con un tanque de almacenamiento por lo que se pueden clasificar como sistemas con almacenamiento o sin almacenamiento (también denominados instantáneos). La energía puede generarse a partir de la combustión de algún combustible como gas, leña o derivados del petróleo, o por el efecto Joule en una resistencia eléctrica. Más recientemente se han desarrollado sistemas alternativos que utilizan bombas de calor y/o colectores solares para proveer la energía necesaria pero estos sistemas normalmente suelen requerir sistemas auxiliares. Las bombas de calor se utilizan comúnmente para refrigeración y acondicionamiento térmico pero también pueden usarse para calentamiento de agua sanitaria. En este último caso suelen contar con una resistencia ubicada en la parte superior del tanque, que se activa cuando la bomba de calor no puede proveer la energía necesaria requerida ya sea porque la demanda de agua es grande o bien las condiciones ambientales externas no permiten trabajar al equipo correctamente. En el caso de los colectores solares, normalmente suelen disponer de un sistema eléctrico o a gas secundario para cuando el agua demandada no alcanza la temperatura deseada (debido a condiciones climáticas adversas). Dentro de los sistemas a gas se encuentran los equipos de combustión estándar y los de condensación que captan además el calor latente de los gases de combustión aumentando así la eficiencia global del sistema. Los calentadores instantáneos presentan la ventaja de disminuir significativamente las pérdidas de calor ya que no almacenan el fluido y por lo tanto las pérdidas al ambiente desaparecen aumentando así normalmente la eficiencia global del sistema. Por contrapartida, presentan la desventaja de necesitar una potencia calórica alta cuando una persona se baña (sobre todo en invierno), que para el caso donde la fuente de energía sea eléctrica, generan un problema en el dimensionado de la red, ya que en general las personas se bañan relativamente a la misma hora [5].

Los Calentadores Solares de Agua (CSA) utilizan la energía solar para calentar directamente el agua (sistemas directos) o un fluido de trabajo (sistemas indirectos). Los sistemas con colectores planos eran los más comunes globalmente pero debido al gran crecimiento presentado por China predominan hoy en día los de tubos evacuados con más de un 70% de la capacidad instalada mundial dejando para los de placa plana un 22%. China presenta un 71% de la capacidad instalada mientras que Europa le sigue con el 11%. Como se comentó anteriormente en China predominan los de tubos evacuados pero sin embargo en Europa ocurre lo contrario y los de placa plana representan más del 80% de la capacidad instalada. El costo y la performance varían mucho dependiendo el país y el clima. Normalmente los sistemas solares reducen el consumo energético para calentamiento de agua en un rango de 40 a 85% dependiendo de las condiciones particulares de cada día. Sin embargo, en países donde los niveles de irradiación presentan una menor variabilidad a lo largo del año, se pueden dimensionar para que atiendan toda la

demanda energética del año. Los sistemas activos (con bombas para circular el agua) son los más comunes en Europa, USA, Australia y Nueva Zelanda mientras que los pasivos (termosifónicos o de circulación natural) que ofrecen una alternativa más económica pero menos eficiente para regiones más templadas son populares en Asia y especialmente en China que posee el 71% de la capacidad mundial. Debido a esto es que los sistemas termosifónicos representan más del 75% de los sistemas instalados globalmente (se estima que en 2015 el 89% de los sistemas instalados eran termosifónicos). En las zonas donde existe alta irradiación los CSA ya son competitivos económicamente contra otros sistemas de calentamiento de agua, como por ejemplo en Medio Oriente, Norte de África y el sur de Europa [5][87].

De acuerdo a la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), si bien se espera que la demanda energética por habitante para calentamiento de agua se pueda mantener o disminuir en los países desarrollados debido a mejoras en la aislación de los hogares y mejoras en eficiencia energética, en los países en desarrollo se espera que aumente debido al aumento en los ingresos y un creciente deseo de confort [19]. Según Vieira et. al. disponer de agua caliente residencial hoy en día se ha estado transformando en un ítem estándar de confort a nivel mundial y por lo tanto es un factor clave para lograr obtener construcciones residenciales eficientes energéticamente [30].

De acuerdo con el Informe del Sector Residencial elaborado por el MIEM, en promedio el calentamiento de agua es responsable del 37,1% del consumo eléctrico del hogar [2]. Esto implica que el calentamiento de agua tiene un impacto significativo en el consumo total de energía eléctrica y por ende en el costo total que esta presenta para los hogares. A la vez este hecho implica una gran oportunidad de reducción de este costo para los hogares si se logran implementar formas de calentamiento más eficientes, ya sea con equipos más eficientes o selección de una tarifa eléctrica más beneficiosa o la utilización de otros energéticos.

En este trabajo se plantea evaluar y comparar las distintas alternativas existentes para el calentamiento de agua:

- Calefón eléctrico
- Bomba de calor
- Equipos eléctricos sin almacenamiento
- Equipos a gas instantáneos y con almacenamiento

Además, se estudiará como varían los costos y el consumo de energía de los sistemas anteriores con precalentamiento solar con CSA.

En general las distintas políticas buscan promocionar y difundir los sistemas más eficientes energéticamente pero se encuentra que la barrera más grande de estos sistemas es el alto costo inicial que presentan [13]. Por lo cual, de las alternativas planteadas se va a determinar la más conveniente desde el punto de vista de los costos de inversión, mantenimiento y operación (energéticos). Se debe tener en cuenta también el efecto ambiental que presenten a través de las emisiones de GHG por lo que además del enfoque desde el punto de vista del usuario donde se compararan los costos antes mencionados y los aspectos de confort que tendrán impacto en las relaciones costo-beneficio a la hora de elegir una alternativa, también se considerara el efecto que las distintas alternativas pueden tener a nivel país. Especialmente se verá si el impacto en las empresas energéticas del país (UTE, ANCAP, Conecta y Montevideo Gas) es significativo. Particularmente este análisis es relevante si se detecta que la forma

más conveniente de calentamiento implica una migración a otro energético y en este caso se debe evaluar a nivel país el impacto que esta migración conllevaría.

Para esto se plantea simular a lo largo del año los escenarios para los distintos sistemas mediante la aplicación de las condiciones del Año Meteorológico Típico calculado por el Laboratorio de Energía Solar (LES). Se tendrá en cuenta para los sistemas eléctricos las distintas tarifas existentes de UTE para ver si es posible un beneficio por este medio y la utilización tanto de GLP como de Gas Natural para los equipos a gas.

El estudio de las distintas alternativas se llevara a cabo simulando el consumo de agua caliente y tibia de una residencia durante todo el año. Estos consumos incluyen duchas, uso de piletas y lavado de platos. Dentro de estos consumos se debe tener en cuenta que para algunas aplicaciones se realiza una mezcla del agua caliente previa al uso con agua corriente mientras que en otras aplicaciones no. Se ha determinado que el consumo de agua caliente sanitaria está muy relacionado a la cantidad de integrantes del hogar y por lo tanto puede también asociarse a la cantidad de cuartos que tiene un hogar [29]. Desgraciadamente no existen datos estadísticos de consumo de agua caliente sanitaria en Uruguay, por lo cual se deberán usar valores de consumo medidos en otros países para generar perfiles de consumo locales.

Con este perfil anual de consumos de agua caliente y tibia se va a realizar un análisis de las distintas alternativas para lograr el mismo servicio tomando en cuenta las eficiencias de los distintos sistemas, los consumos y condiciones mencionados anteriormente.

La estructura de esta Tesis será la siguiente: en el capítulo 2 se analiza la demanda de agua caliente y todo lo que se encuentra relacionado a esta demanda. Luego, en el capítulo 3 se presenta los distintos sistemas de calentamiento de agua disponibles. En el capítulo 4 se comentan las métricas utilizadas en el calentamiento de agua. En el capítulo 5 se presentan los energéticos más comúnmente utilizados y las normativas, mientras que en el capítulo 6 se define la metodología seguida para realizar los cálculos necesarios para poder comparar. Por último, en el capítulo 7 se muestran y se discuten los resultados y en el capítulo 8 se presentan las conclusiones y las posibles perspectivas de futuras investigaciones.

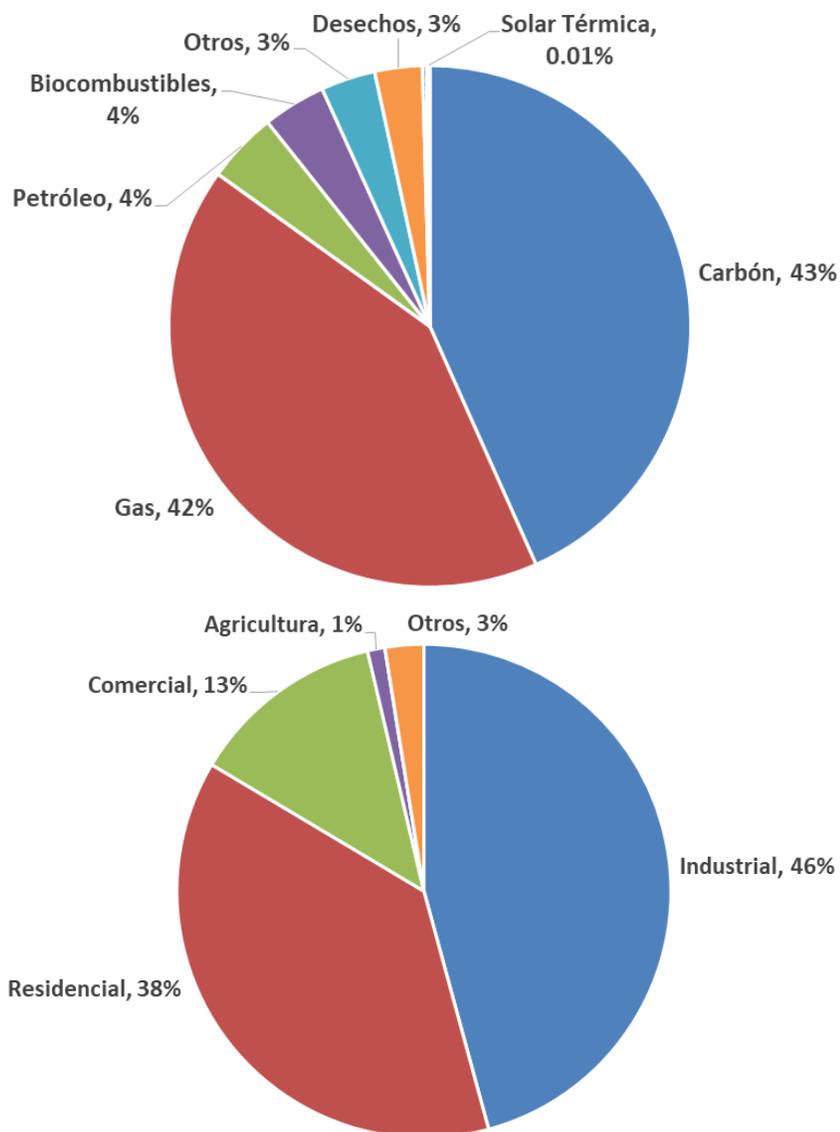
Aclaración: Cuando se habla de **agua caliente** se refiere a agua que proviene directamente del sistema de calentamiento que se setea en 60 °C (temperatura recomendada para evitar la proliferación de Legionella) mientras que cuando se habla de **agua tibia**, se refiere a el agua utilizada en duchas y lavados de manos que se encuentra a 38 °C (temperatura similar a la corporal).



## **2. DEMANDA DE AGUA CALIENTE RESIDENCIAL**

### *2.1. Calentamiento de agua sanitaria en el mundo*

La demanda de energía térmica que es aquella energía que es obtenida de la combustión, los reactores nucleares, reservorios geotérmicos, captura de radiación solar, reacciones exotérmicas y bombas de calor representa casi la mitad de la demanda energética mundial y hoy en día es principalmente cubierta utilizando combustibles fósiles como son el carbón, el petróleo y el gas. Esta energía puede utilizarse para calentar, enfriar o para ser convertida en energía mecánica o en energía eléctrica. Cómo se puede ver en la Figura 1 el 89% de la demanda se cubre con combustibles fósiles y los principales sectores consumidores son el industrial y luego el residencial [67, 68].



Fuente: IEA (2015)

Figura 1. Producción de energía para calentamiento a nivel mundial discriminada por fuente y por sector de consumo [67].

Dentro de los sistemas de calentamiento de agua algunos estudios diferencian entre sistemas primarios y secundarios. Los sistemas primarios proveen a toda la demanda para calentamiento de agua de la vivienda mientras que los secundarios solo satisfacen una demanda limitada como puede ser un único punto de consumo en un baño o una cocina [5].

En Europa 32,4% de los hogares tienen un sistema secundario: 18,5% sistema eléctrico con almacenamiento para la cocina, 7,9% una segunda unidad eléctrica instantánea y 5,9% un pequeño

sistema a gas. De estas unidades secundarias en el 2004/05 se vendieron un 80% eléctricos y un 20% a gas y se estima que un 70% fueron para reemplazo y un 30% nuevos [5].

## **América del Norte**

En Estados Unidos el sector residencial consume el 21% de la energía total y dentro de esta, el calentamiento de agua es el segundo uso energético más grande luego del acondicionamiento térmico con el 20% en promedio y un rango de 14 a 25% de la energía total consumida. La mayoría de los hogares utilizan sistemas de almacenamiento con gas natural (52 %) seguido por los sistemas que consumen energía eléctrica (41%) [3, 5, 27]. Estos valores son promedio para el país ya que existe una gran variabilidad dependiendo de la región. La mayoría de las ventas (95%) son sistemas de almacenamiento eléctrico o a gas y el 5% restante corresponde a sistemas instantáneos, especialmente a gas. Si bien las ventas de bombas de calor han crecido en el mercado, hoy en día el gobierno de USA está promoviendo sistemas instantáneos a gas de alta eficiencia por lo que la mayor parte de las ventas se centran en equipos Energy Star<sup>1</sup> que consumen alrededor de 14 a 55% menos energía que los estándar. El programa Energy Star espera aumentar la consciencia de los consumidores sobre el potencial ahorro que ofrecen los sistemas más eficientes. Sin embargo, a pesar de que se puede ver un aumento en las ventas de equipos Energy Star de alta eficiencia, la mayoría de los equipos vendidos apenas llegan a cumplir los mínimos requisitos federales de eficiencia. Se ha reportado que USA puede ahorrar un 2% del consumo total de energía del país al cambiar a equipos de bomba de calor eficientes y CSA pero que no será posible sin mejoras en los precios de venta de los equipos eficientes [3, 5].

En Canadá el sector residencial consume el 17% del total de la energía consumida y dentro de esta, el 24% corresponde al calentamiento de agua [24]. Para casas construidas desde el 1945 al 1990 el porcentaje de hogares que utilizaba electricidad y gas natural era similar, pero últimamente el uso de electricidad ha decaído y el de gas natural aumentado para las nuevas construcciones. Por lo tanto se estima que los hogares que calientan el agua con gas natural está en el rango de 58 a 72% y los que calientan con electricidad en el rango de 23,5% a 36,5% [33].

En México el 17% de la energía es consumida por el sector residencial dentro de la cual el 25% se usa para el calentamiento de agua. Los equipos a GLP son alrededor del 44% de los instalados y se destaca la particularidad de que México no utiliza equipos eléctricos para el calentamiento agua sanitaria [35].

## **Europa**

En Europa el sector residencial consume el 25% de la energía total y en dicho sector ocurre lo mismo que en Estados Unidos ya que el calentamiento de agua es el segundo mayor consumo luego del acondicionamiento térmico. El calentamiento de agua representa el 13% del consumo de energía de los hogares. Existen claras diferencias entre los distintos países ya que en los países más fríos pueden verse mayores consumos, por lo cual el uso de energía eléctrica para calentamiento de agua varía muchísimo entre los países, va desde el 5% en Rumania hasta el 65% en Estonia [4, 26]. Los sistemas eléctricos son los que dominan el mercado con aproximadamente el 55% de las ventas [5]. La difusión de calentadores de agua solares varía enormemente entre los distintos países. El promedio de hogares con CSA para el calentamiento de agua es de 2,1% pero se puede ver que Chipre lidera con un 73% de los hogares con

---

<sup>1</sup> Energy Star es un estándar internacional para productos eficientes desde el punto de vista energético originado en Estados Unidos. Se explica en profundidad en el apartado 5.3

CSA debido a su buena radiación solar. Sin embargo, Grecia cuenta también con buena radiación pero solo el 30% de los hogares presentan CSA. Como ejemplo de país con alta penetración de CSA y un recurso solar moderado se encuentra Austria con un 20% de los hogares [4]. Se ha reportado que el consumo energético para calentamiento de agua sanitaria corresponde al 22% del total de energía consumida en los hogares del Reino Unido lo cual es sensiblemente mayor al promedio debido principalmente a que presenta un clima más frío [12].

En España el sector residencial representa el 17% del consumo final total de energía del país y el 25% de la demanda de energía eléctrica. Este consumo está en alza debido a diversos factores como son el aumento del número de hogares, el mayor confort requerido y el aumento de equipamiento en los hogares. Para el calentamiento de agua el sistema más utilizado es la caldera individual a gas con el 61% de los hogares, seguido por sistemas termoeléctricos (calefones) con el 29% y la caldera colectiva a gas con el 6%. Las fuentes de energía más usadas son el gas natural con el 40% de los hogares, el butano con el 26% y la electricidad 22%. El calentamiento de agua representa el 7,5% del consumo eléctrico de los hogares y el 25% del consumo de combustibles totalizando un 18,9% de la energía total consumida final de los hogares [18, 12].

## Oceanía

En Australia el sector residencial consume el 11,2% del total de la energía del país dentro de la cual el calentamiento de agua es el segundo mayor consumo de energía de un hogar con un consumo del 21% de la energía del hogar. Alrededor del 48% de los equipos utilizan gas natural y 45% electricidad. En este país el aumento del uso del gas natural como energético para el calentamiento de agua ha coincidido con la expansión de la red de gas natural ya que cuando este energético está disponible los consumidores presentan una preferencia por el gas natural sobre la electricidad. Esto se debe principalmente a que los equipos a gas entregan una mayor potencia térmica y a que el costo de la electricidad ha aumentado a un ritmo mayor al precio del gas. Además, las unidades instantáneas presentan menores necesidades de espacio y pueden proveer un flujo continuo de agua [34, 50, 51].

En Nueva Zelanda el sector residencial consume el 11% de la energía total del país y dentro del consumo residencial, el calentamiento de agua es responsable del 29% del consumo. En este país existe el programa E3 el cual les pide a los proveedores que aporten datos sobre las ventas de varios equipos residenciales para evaluar el cambio en eficiencia y poder así calcular los ahorros energéticos provenientes de mejoras en la eficiencia energética. Según estos reportes alrededor del 65% de los equipos vendidos en los últimos 5 años son eléctricos mientras que los restantes son a gas [48, 49].

## África

En Sudáfrica el 25% de la energía total del país es consumida por el sector residencial donde alrededor del 40% de esta energía es destinada al calentamiento de agua. El 90% de las casas urbanas y el 42% de las rurales tienen acceso a la red eléctrica y se estima que más del 95% de los sistemas son eléctricos (situación similar a la de Uruguay, ver apartado siguiente). Por lo tanto se estima que existe un ahorro potencial de alrededor del 70% a través de CSA correctamente dimensionados con un elemento eléctrico de respaldo en comparación con los calentadores eléctricos tradicionales [36].

## América del Sur

En Chile el sector residencial consume el 25% de la energía total y dentro de este el 30% del total de consumo energético de una residencia (electricidad y combustibles) se destina al calentamiento de agua [7].

En Argentina debido entre otros factores a los grandes subsidios existentes, el gas natural es el principal componente de la matriz energética y equivale a más del 50% de la energía primaria del país. El calentamiento de agua es el segundo mayor consumo de gas residencial con un 33% del total de gas consumido [10].

En Brasil cerca del 22% del consumo total de energía eléctrica es consumida por el sector residencial del cual un 20% de este se utiliza para calentamiento de agua con “chuveiros” eléctricos mayormente. El consumo varía dependiendo de la estación del año registrándose que corresponde a un 18% en verano y un 22% en invierno promediando el 20% anual del consumo de los hogares. También se encontró que varía con la condición socioeconómica y cuanto menor es la latitud menor es el consumo para calentamiento de agua sanitario. Los “chuveiros” eléctricos superan en todas las regiones de Brasil el 80% de los sistemas instalados siendo además los sistemas a gas y solares minoritarios. El alto grado de difusión del “chuveiro” se explica por el bajo costo de adquisición y operación que presenta. Sin embargo, estos sistemas generan un problema a nivel país ya que se utilizan normalmente en el periodo de punta impactando la curva de carga y haciendo que el consumo en punta sea mucho mayor [6, 8, 14].

## Calentadores Solares de Agua y Bombas de Calor

Los sistemas solares térmicos para aplicaciones residenciales (Calentadores Solares de Agua) ya son una tecnología madura que se han implementado exitosamente en muchos países por más de 30 años. En países como Barbados, Israel y Chipre 80 a 90% de los hogares tienen CSA en sus techos aunque el mayor mercado se encuentra en China donde en el año 2012 los CSA fueron el 85% de la nueva capacidad instalada (76% en 2015). Sin embargo a nivel mundial solo 1,2% del calentamiento de agua en el sector residencial es cubierto por CSA [19][87]. En el año 2012 los 6 primeros países en capacidad instalada eran China con 180 GWth, Alemania y Turquía con 11 GWth cada uno y Brasil e India con 4 GWth cada uno. Seguidos de USA y Australia con 2 GWth cada uno. En términos de cantidad instalada per cápita Chipre, Austria, Israel, Barbados y Grecia fueron los 5 principales países. La alta penetración en Chipre (90%) e Israel (85%) fue debido a las leyes introducidas en el año 1980 que requería que todas las nuevas casas construidas tuvieran CSA. En el año 2012 Chipre introdujo un subsidio para facilitar el recambio de los colectores solares o el sistema entero de acuerdo a las últimas directrices técnicas. China sigue siendo el mercado más importante de CSA debido principalmente a los bajos costos de los sistemas (más de 5000 compañías producen en China) y la obligatoriedad de instalar CSA en áreas urbanas desde el 2006 además de subsidios para las zonas rurales [19]. En algunos países como China, Israel y Turquía, los CSA ya son la opción más económica, mientras que en otros países como la Unión Europea, el desarrollo de esta tecnología ha sido alentado por subsidios y mandatos [19]. Debido a esto es que ya en el 2004 Israel, Grecia y China presentaban la potencia térmica acumulada respectivamente de 52, 19 y 3,33 MWth por 100 mil habitantes mientras que Brasil solamente presentaba 0,89 MWth por 100 mil habitantes demostrando la gran diferencia que existe [8].

Por último, en Japón se utilizan principalmente bombas de calor mayormente para el calentamiento de agua y en especial están desarrollando bombas de calor con dióxido de carbono como refrigerante para lograr eficiencias muy altas [5].

Cabe destacar que en lugares donde la demanda de energía para el acondicionamiento térmico es baja el consumo energético para calentamiento de agua sanitaria puede llegar a representar el 40% a 50% del consumo total de energía. Esto ocurre por ejemplo en construcciones eficientes energéticamente en Francia [30].

2.2. *Calentamiento de agua del sector residencial en Uruguay*

Como se puede apreciar en la Tabla 1 y en la Figura 2, en Uruguay el sector residencial es responsable de alrededor del 20% del consumo energético final del país y como se puede ver en la Figura 3 presenta un crecimiento anual de aproximadamente un 2% [1, 20].

Tabla 1. Consumo energético Uruguayo por sector [1, 20].

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Residencial</b>	21%	21%	21%	21%	19%	18%	18%
<b>Comercial/Servicios/Sector público</b>	8%	8%	8%	8%	7%	7%	7%
<b>Transporte</b>	29%	30%	30%	31%	29%	28%	28%
<b>Industrial</b>	35%	34%	34%	35%	39%	42%	42%
<b>Agro/Pesca/Minería</b>	6%	6%	6%	6%	5%	5%	5%
<b>Consumo Final Total (ktep)</b>	3.526	3.643	3.688	3.859	4.098	4.399	4.599
<b>Consumo Final Total (TWh)</b>	41,0	42,4	42,9	44,9	47,7	51,2	53,5

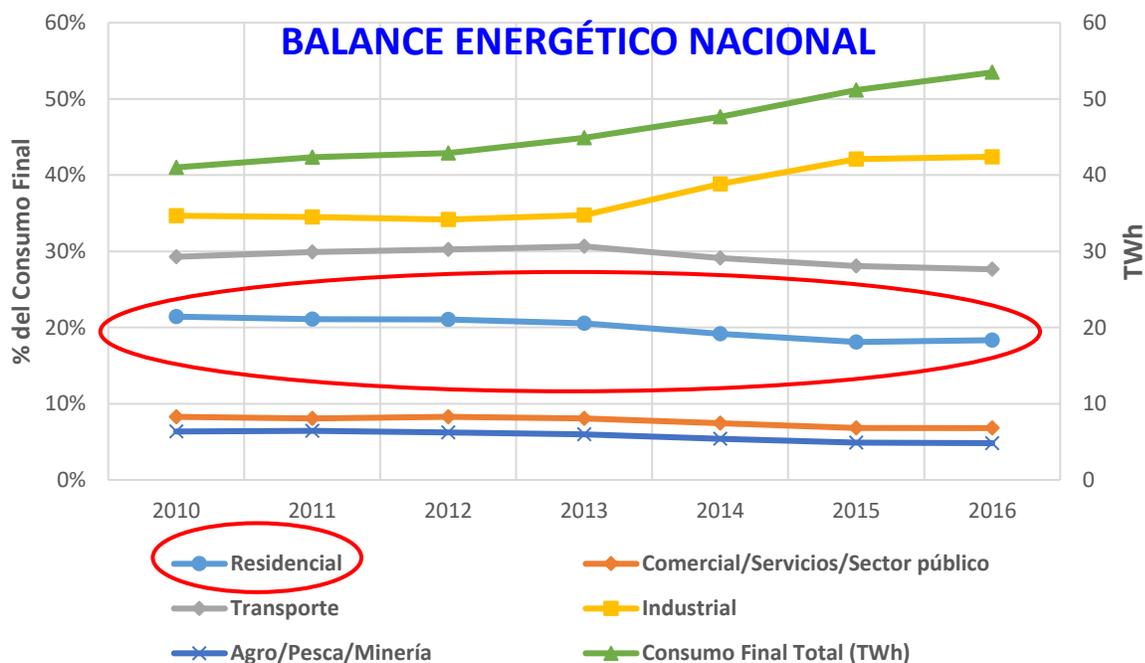


Figura 2. Grafica del consumo energético Uruguayo por sector (Elaboración propia a partir del Balance energético Nacional [20, 37]).

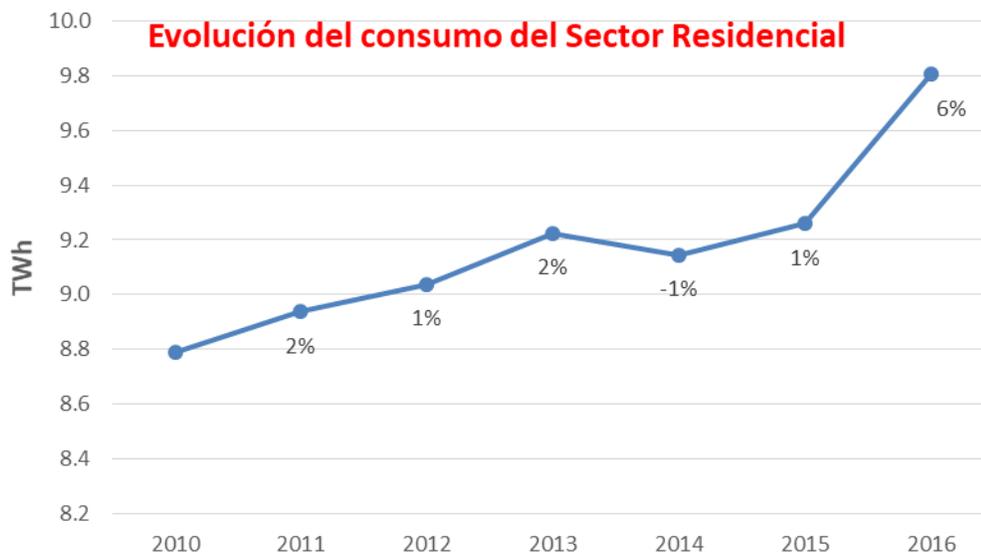


Figura 3. Evolución del consumo final total del Sector Residencial. Los porcentajes representan el aumento respecto al año anterior (Elaboración propia a partir del Balance energético Nacional [20, 37]).

En la Tabla 2 se puede observar que participación tiene el calentamiento de agua sobre el total de energía consumida para cada una de las fuentes. Se reportó que el calentamiento de agua en el sector residencial era responsable del 18,1% del consumo de energía neta y del 35% de la energía útil de los hogares siendo utilizada el resto de la energía para otros usos en el hogar. Dentro de los energéticos usados para el calentamiento de agua los que presentan más participación en el total consumido por el hogar son el gas natural y la energía eléctrica seguidos por el gasoil, tanto en energía neta consumida como en energía útil obtenida. Al observar la energía útil consumida vemos como la participación en el consumo de energía eléctrica aumenta sensiblemente su participación mientras que las del gas natural y gasoil disminuye debido a su menor eficiencia para pasar de energía neta a útil [2].

Tabla 2. Participación del calentamiento de agua en cada uno de los Energéticos en el sector residencial (2006) [2].

	Gas Nat	Supergas	Gas Prop	Gasoil	Fuel Oil	Queros	Leña	Res. Biomasa	E. Electrica	Total
<b>Energía Neta</b>	52%	6%	9%	24%	1,5%	1,5%	4%	9%	37%	18%
<b>Energía Util</b>	48%	6%	9%	21%	2%	2%	8%	14%	47%	35%

Cuando se observa en la Tabla 3 la participación de los energéticos en el calentamiento de agua, o sea del total de la energía consumida cual es la cantidad de energía que se consume de cada fuente, se puede observar que la mayoría del consumo para el calentamiento de agua en el país proviene de la energía eléctrica ya que esta representa el 79% de la energía neta y 91% de la energía útil [2].

Tabla 3. Participación de los Energéticos en el calentamiento de agua en el sector residencial (2006) [2].

	Gas Nat	Supergas	Gas Prop	Gasoil	Fuel Oil	Queros	Leña	Res. Biomasa	E. Electrica	Total
<b>Energía Neta</b>	6%	4%	0,1%	1%	0,1%	0%	10%	0,6%	79%	100%
<b>Energía Útil</b>	3%	2%	0,0%	1%	0,1%	0%	3%	0,1%	91%	100%

La Tabla 4 muestra los rendimientos para el calentamiento de agua en Uruguay de los distintos energéticos según el Informe del Sector Residencial de la DNE, el cálculo de estas eficiencias no se encuentra detallado y parecería ser demasiado alta la eficiencia presentada para la Energía Eléctrica. Pero sí se puede ver que la eficiencia de energía eléctrica es la más alta y por eso aumenta su participación en las figuras anteriores en la energía útil vs la energía neta [2].

Tabla 4. Rendimientos de utilización por fuentes para el calentamiento de agua en el sector residencial (2006) [2].

Gas Nat	Supergas	Gas Prop	Gasoil	Fuel Oil	Queros	Leña	Res. Biomasa	E. Electrica	Total
50%	45%	45%	52%	60%	35%	21%	18%	94%	82%

Como se puede apreciar en la Tabla 5 el caso de Uruguay es similar a muchos países del resto del mundo donde el calentamiento de agua es responsable del alrededor del 4% del consumo total de energía (a excepción de Chile y Sudáfrica donde la participación es mayor). Por lo tanto lograr ahorros en este ámbito puede tener un impacto significativo en el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG).

Tabla 5. Consumo de energía residencial y para el calentamiento de agua en el mundo (Elaboración propia en base a la información presentada en este capítulo).

	Consumo sector residencial (%)	Consumo para calentamiento de agua (%)	% del total de Energía del país
<b>USA</b>	21%	20%	4,2%
<b>Canadá</b>	17%	24%	4,1%
<b>Europa</b>	25%	13%	3,3%
<b>España</b>	17%	19%	3,2%
<b>Australia</b>	11%	21%	2,4%
<b>Nueva Zelanda</b>	11%	29%	3,2%
<b>Sudáfrica</b>	25%	40%	10%
<b>Mexico</b>	17%	25%	4,3%
<b>Chile</b>	25%	30%	7,5%
<b>Brasil</b>	22%	20%	4,4%
<b>Uruguay</b>	<b>20%</b>	<b>18%</b>	<b>3,6%</b>

### 2.3. Relevancia del tema para Uruguay

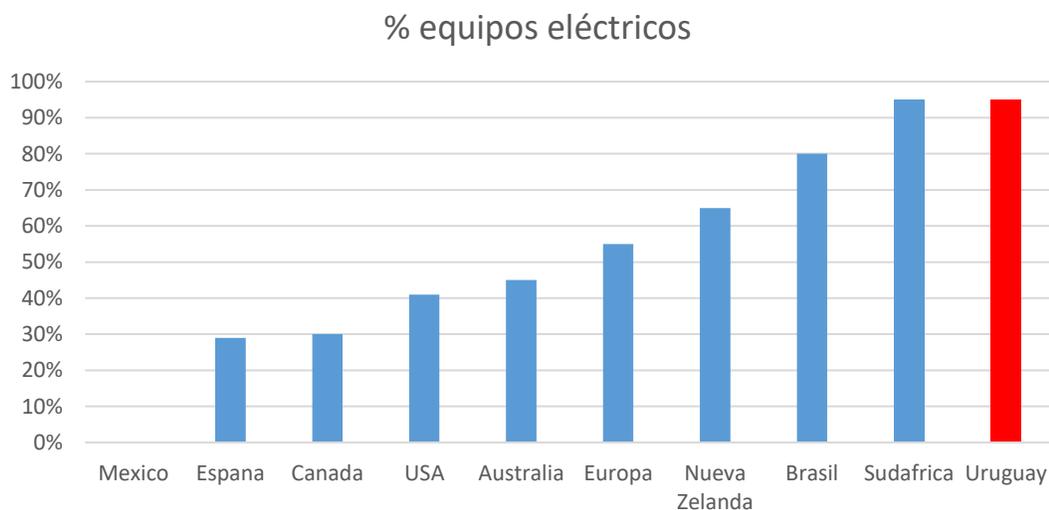


Figura 4. Porcentaje de equipos eléctricos para el calentamiento de agua en los distintos países (Elaboración propia en base a la información presentada en este capítulo).

Como se puede ver en la Figura 4, Uruguay es un caso particular en el mundo donde alrededor del 89% de los hogares utiliza calefones para el calentamiento de agua (Tabla 6). Luego le sigue el calentador tipo chuveiro con alrededor del 6% de los hogares y puede asociarse a los hogares cercanos a la frontera con Brasil ya que este método de calentamiento es muy común en el país vecino (Figura 5). Mientras que el 1% utilizan gas y un 5% otras fuentes (leña, fuel oil, etc.). El Informe del Sector Residencial elaborado por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) sitúa la eficiencia promedio del calentamiento de agua residencial en 81,7 %. Debido a las ineficiencias que presentan los métodos de calentamiento actuales, se ve un potencial significativo de mejora de la eficiencia en el calentamiento de agua en Uruguay [1, 2, 21].

Tabla 6. Porcentajes de hogares con Calefones y calentadores instantáneos por año (Elaboración propia a partir de [21]).

	Hogares con equipos con almacenamiento		Hogares con equipos instantáneos	
	Cantidad	% del total	Cantidad	% del total
<b>2008</b>	769.368	86%	124.251	14%
<b>2009</b>	787.383	86%	132.345	14%
<b>2010</b>	888.160	86%	144.348	14%
<b>2011</b>	922.917	87%	135.730	13%
<b>2012</b>	908.249	88%	124.983	12%

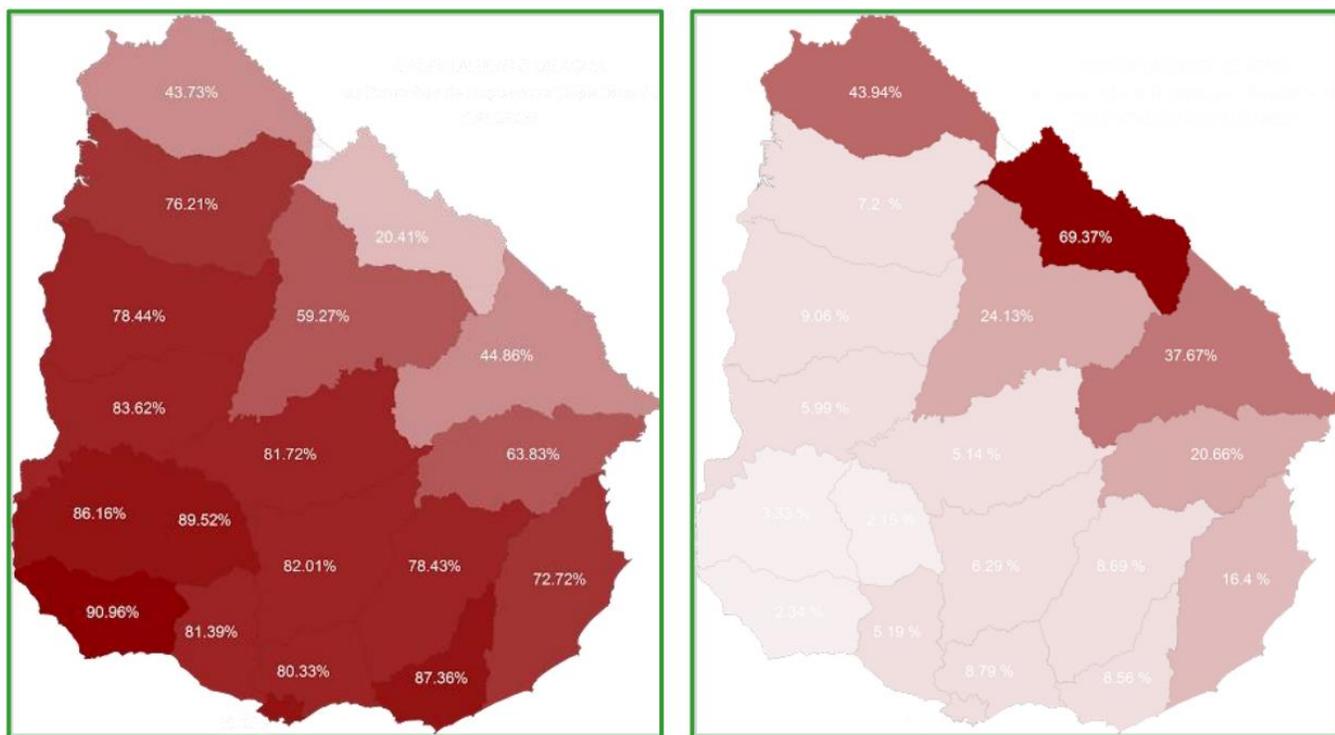


Figura 5. Porcentajes de hogares con Calefones (izquierda) y calentadores instantáneos (derecha) por departamento para el año 2012 [21].

#### 2.4. Consumo y almacenamiento de agua caliente

El consumo de agua caliente promedio es una función que depende de la cantidad de ocupantes de la vivienda, sus hábitos de consumo, el clima y la estación. Sin embargo, este consumo es complejo ya que engloba un gran espectro de usuarios y aplicaciones que tienen variabilidad en la temperatura de entrada del agua, el volumen, el caudal y el tiempo de uso. Los principales usos del agua caliente son las duchas, los baños, las piletas, las lavarropas y los lavaplatos. Todos estos son eventos discretos en el tiempo iniciados por los ocupantes y cada uno tiene un rango característico de caudal y tiempo, o sea un volumen determinado. El consumo también es idiosincrático de cada hogar y puede variar en un orden de magnitud dependiendo de la cantidad de integrantes y los hábitos de cada hogar. El momento del día en el cual es demandado también varía significativamente y especialmente al comparar días de trabajo vs fines de semana. Otros factores que impactan son los periodos de vacaciones, la variabilidad entre las distintas personas en la cantidad de baños por día, cargas de ropa y cantidad de lavados. Dentro de estos especialmente los baños varían mucho en duración junto con las piletas que presentan distinto caudal y duración [29].

El factor más influyente en los eventos de consumo de agua es el comportamiento de los ocupantes ya que los distintos hábitos entre las personas junto con las variaciones aleatorias para un mismo individuo se combinan para producir patrones con alta variabilidad para un hogar específico. Mientras que otros factores son más predecibles como por ejemplo el número de personas que componen el hogar ya que normalmente se asume tiene un efecto lineal en el consumo de agua. Este factor solo afectaría la frecuencia de los eventos ya que normalmente se asume que el comportamiento típico de cada miembro de la familia es parecido (incluyendo tiempo, duración y caudal). El clima y la estación afectan también indirectamente al variar la temperatura de entrada del agua. Cuanta más alta sea esta temperatura menor va a ser el caudal de agua caliente necesaria para obtener la temperatura de mezcla (agua tibia) deseada en piletas, duchas y baños. Normalmente se asume que la mayoría de los lavarropas y lavaplatos no ajustan el caudal de agua caliente ni el volumen basándose en la temperatura del agua de entrada. Sin embargo, el consumo de estos electrodomésticos normalmente está fuertemente influenciado por la eficiencia que estos presentan. Los más eficientes comúnmente reducen el consumo de agua caliente al reducir la cantidad de agua que se precisa (el volumen) para lavar los platos o la ropa. Esto lo logran típicamente al reducir el número de ciclos o usando menos agua por ciclo resultando normalmente en eventos de demanda de agua más cortos. Por ejemplo los electrodomésticos Energy Star pueden consumir una cantidad de agua caliente diferente dependiendo de sus estrategias de control y eficiencias [29].

Por último, un factor importante que impacta sobre la duración de los eventos es la magnitud que presenten las pérdidas en la distribución. Si el sistema de distribución presenta tuberías largas, diámetros sobredimensionados o grandes pérdidas antes de llegar al lugar de consumo, es probable que el usuario necesite esperar una cantidad de tiempo significativa antes de que el agua caliente llegue al lugar de consumo. En muchos casos esto aumenta el tiempo del evento de consumo de agua pero no siempre ya que mucha gente empieza a lavarse las manos antes de que el agua caliente llegue a la canilla. El consumo de electrodomésticos normalmente no es afectado por las pérdidas en la distribución. Cabe destacar que las pérdidas en el sistema de distribución se ven influenciadas fuertemente por el tiempo entre consumos sucesivos [29].

Como se comentó anteriormente, el consumo de agua varía si se trata de un día de semana o un fin de semana pero según reporto Hendron & Burch (2008) solamente los baños son significativamente más comunes en los fines de semana, ocurriendo tres veces más que en los días de semana [29].

Keinath & Garimella (2017) han reportado una variabilidad significativa en los patrones de demanda de agua caliente sanitaria, ya que reportan valores que se encuentran en el rango de 87 a más de 417 litros por día. No especifican si esta es agua caliente o tibia pero se puede apreciar que la variación es de un orden de magnitud [32].

Como se puede apreciar en la Figura 6, el nivel de detalle del perfil de consumo necesario depende del objetivo del estudio. Los factores más relevantes son el volumen promedio diario, el caudal, el tiempo de duración de cada evento y la variabilidad en los patrones de consumo. Si se desea comparar equipos con almacenamiento y no se desea considerar el posible agotamiento del agua caliente, el único parámetro significativo es el consumo diario ya que el flujo y tiempo son mayormente irrelevantes aunque la performance de algunos equipos puede verse impactado por estos factores. Se debe tener en cuenta que la performance de los CSA es sensible al momento del día del consumo y a la variabilidad día a día de las condiciones climáticas [29].

Study Objective	Draw Characteristics Needed
Comparing storage water heater energy <sup>a</sup>	Daily volume only
Sizing of storage water heater <sup>b</sup>	Timing, volume ("worst" draw sequence)
Compare SWH with load-side heat exchanger <sup>c</sup>	Volume, flow rate, timing, and variability
Minimize distribution network losses <sup>d</sup>	Volume, flow rate and timing

<sup>a</sup> With no consideration of runout,

<sup>b</sup> Runout is the key issue,

<sup>c</sup> Load-side heat exchanger effectiveness depends on flow rate,

<sup>d</sup> Compare recirculation types, minimize stranded water,

Figura 6. Ejemplos de objetivo de un estudio vs las características de la demanda necesarias a considerar [29].

En USA el Departamento de Energía establece en el código de regulaciones federales un método de testeo uniforme para poder medir el consumo de energía de los sistemas de calentamiento de agua residencial, como 6 consumos de 11 galones cada uno separados por una hora con un caudal de 3 galones por minuto. Este esquema se debe utilizar solo cuando el único parámetro importante es el volumen promedio demandado diario. Para los CSA se utiliza el volumen demandado por hora ya que este esquema de volumen demandado por hora se utiliza si se busca evaluar volumen y momento en el

día del consumo, pero no debe importar evaluar el caudal y la variabilidad. Para incorporar la dependencia con el caudal un esquema donde se definen 3 caudales fue definido. 0,5 gpm para representar los consumos de las piletas, 1,5 gpm para representar las duchas y el lavaplatos y 2,5 gpm para representar los baños y las lavarropas. Para dicho estudio se estimó que el consumo los fines de semana era un 45% mayor al de los días de semana [29].

### 2.5. Perfiles de consumo de agua caliente residencial

Los estudios de patrones de consumo de agua caliente sanitaria son difíciles de llevar a cabo y además costosos y por lo tanto existen pocos estudios en la bibliografía. Si bien existen varios modelos, estos normalmente son viejos. Esta falta de datos se debe principalmente a que los hogares normalmente no están equipados con medidores que puedan proveer el flujo y la temperatura para poder realizar los balances energéticos necesarios para determinar el uso de agua caliente sanitaria. Generalmente se mide el total de agua demandada por un hogar pero desafortunadamente esta no diferencia entre agua caliente y fría. Esta dificultad a la hora de obtener los datos es la principal razón detrás de la falta de disponibilidad de datos y especialmente si se consideran las diferencias regionales y culturales que influyen muy significativamente en el consumo y puede llevar a que para muchas zonas no haya estudios relevantes disponibles [80].

En los casos donde se consiguen datos de los vendedores de energéticos, no se dispone de información demográfica como la cantidad de ocupantes del hogar o el equipo de calentamiento de agua [80].

En el marco de lo anterior es que se pueden encontrar algunos pocos estudios. Fuentes et.al. realizaron un review sobre calentamiento de agua residencial donde recopilan los siguientes valores de consumo residencial para calentamiento de agua sanitaria. Evarts et. al. realiza un estudio sobre el consumo estimado de agua caliente sanitaria para poder dimensionar un sistema solar térmico y reporta los mismos estudios que recopila Fuentes et. al. y que se mencionan a continuación. Pearlman & Mills estudiaron los patrones de consumo de 58 hogares en Ontario, Canadá y en base a sus resultados se construyó el handbook ASHRAE HVAC Applications en 2003 para el diseño de sistemas de calentamiento de agua. Se concluye en dicho estudio que el consumo de agua caliente promedio fue de 236 litros por día y se encuentra en el entorno de 47 a 86 litros per cápita por día. Becker & Stogsdill revisaron y compararon 9 estudios a lo largo de América del Norte concluyendo que se consumían 239 litros por día de agua caliente pero no informaron el valor per cápita. Swan et al. Realizo un modelo utilizando redes neurales y un modelo estadístico donde concluyo que el consumo de agua caliente promedio de los hogares fue de 208 litros por día y 67 litros per cápita por día. DeOreo & Mayer reportaron consumos para residencias que catalogaron como de alto consumo de 248 litros por día de agua caliente y 95 litros per cápita por día. Merrigan reporto un consumo de 54 a 83 litros de agua caliente per cápita por día para un grupo de 74 hogares en Carolina del Norte. Por último, en Canadá se utiliza un estándar de 60 litros per cápita por día [80, 84]. En la Figura 7 se puede ver un resumen del consumo a lo largo del día y del año.

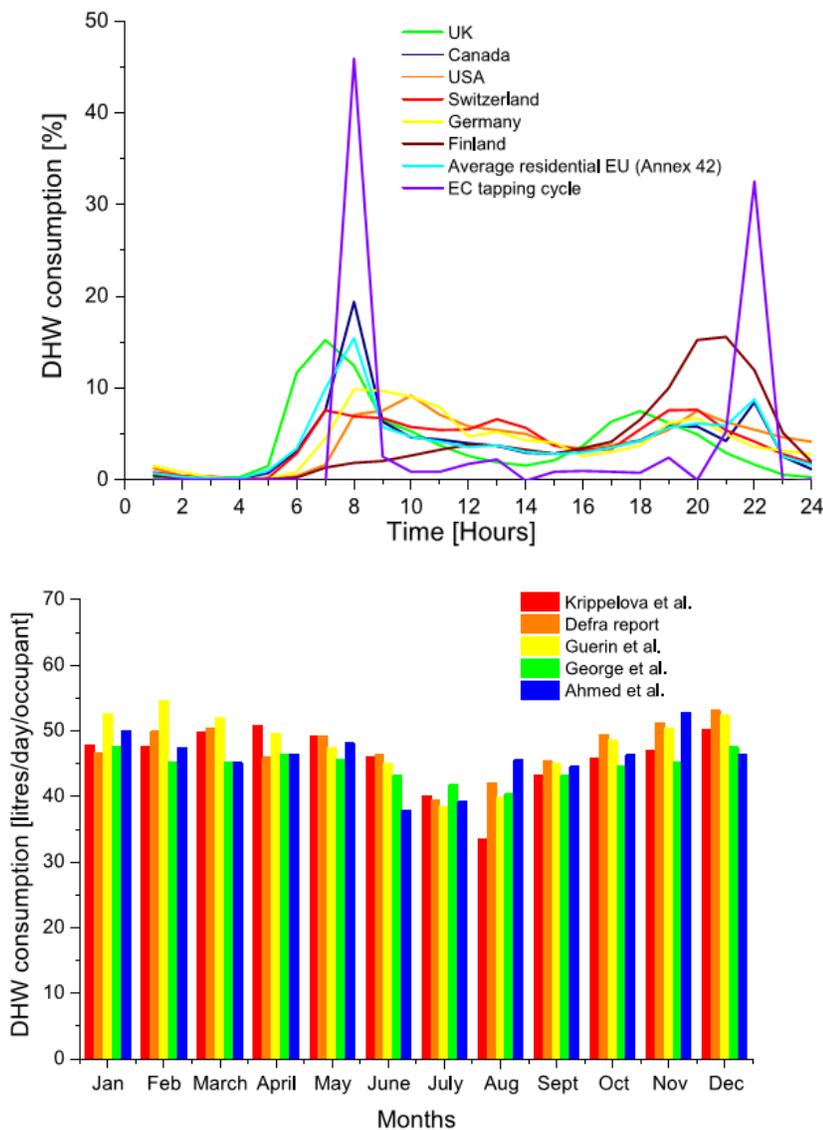


Figura 7. Perfiles promedio de consumo de ACS a lo largo del día (arriba) y consumo de ACS per cápita a lo largo del año (debajo) [80].

En estudio realizado en Brisbane, Australia Vieira et al. consideró para realizar un estudio de comparativa de sistemas y tarifas un hogar con un promedio de 3 personas y un total de 100 m<sup>3</sup> / año (91 litros por persona por día) [30].

En USA la Water Research Foundation publico valores de consumo de agua tibia total de una casa promedio en 2016. Este estudio informa unos 20.9 galones (79 litros) por día por persona [85]. Sin embargo, el NREL utiliza valores no lineales con la cantidad de integrantes y los consumos para lavado de platos, duchas y canillas se encuentra en el rango de 146 litros por persona por día para una casa de

1 persona y 73 litros por persona por día para una casa de 3 persona lo cual parece en línea con lo reportado por la Water Research Foundation [3, 29, 52].

En el Reino Unido un estudio realizado por el Department for Environment, Food and Rural Affairs informa que se consumen en promedio 74,6 litros por día por persona de agua tibia [66]. También, para el Reino Unido se ha derivado una ecuación de British Gas donde estiman el consumo por persona en 63 litros por día por persona, el cual es sensiblemente más bajo al aumentar la cantidad de integrantes del hogar [86].

### **3. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA**

A continuación se pasara a describir estructura y funcionamiento de los principales sistemas de calentamiento de agua residencial utilizados en el país.

Un concepto útil para estudiar el rendimiento de los equipos es el Energy Factor (EF). El mismo es una medida de eficiencia global del calentador incluyendo la eficiencia de recuperación y las pérdidas en standby. Su cálculo es a partir del cociente de energía útil de salida sobre energía convencional consumida durante cierto período de tiempo y bajo circunstancias específicas [5, 9]. Será desarrollado más adelante en el apartado 4.1.

#### *3.1. Calentadores a gas*

Estos sistemas utilizan la combustión de gas natural o GLP para calentar directamente el agua. Los sistemas que utilizan gas natural son comunes en áreas donde existe una red de gas natural mientras que los de GLP requieren de algún lugar donde almacenar el combustible. La combustión del gas es simple, efectiva y confiable (siguiendo los protocolos de seguridad) haciéndola una metodología apropiada para el sector residencial [32].

Además de las variaciones que presentan los sistemas en la aislación, el EF también es afectado por el diseño del quemador, la forma de los bafles de la chimenea (que tienen como función la disminución de la velocidad de los gases de salida para aumentar así el intercambio de calor al agua) y el área de intercambio entre los gases de la chimenea y el agua.

##### *3.1.1. Sistemas a gas con almacenamiento*

Son los más comunes y menos eficientes de los sistemas a gas (mínimo  $EF=0,58$  para una unidad de 50 galones (189 l) según estándares federales de USA). Esta baja eficiencia es causada por dos factores: la eficiencia de combustión y las pérdidas del tanque al ambiente. Un gran factor de ineficiencia es que los sistemas comunes necesitan ventear los gases de la combustión a una temperatura relativamente alta. Esto se debe a que si los gases de escape se enfriaran a una temperatura donde el vapor de agua pudiera condensar, el azufre presente en el odorizante que se adiciona por seguridad puede combinarse con el agua que condensa para producir ácido sulfúrico que corroe la chimenea y por ende destruyendo el sistema. Estos sistemas presentan eficiencias típicas del 76% y un EF comúnmente de 0,6 [13, 28].

Se puede observar en la Figura 8 una representación esquemática de un sistema a gas con almacenamiento.

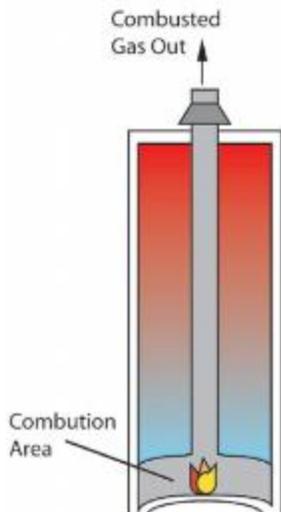


Figura 8. Esquema de sistema a gas con almacenamiento [32].

Los sistemas de calentamiento a gas con almacenamiento certificados Energy Star han reportado ser normalmente un 8% más eficientes que los modelos no certificados. Estos equipos certificados presentan las ventajas de ser [16]:

- Fácil de instalar ya que se utiliza la instalación existente de agua, gas y conexiones de salida de los gases de combustión.
- Fáciles de entender ya que utiliza medidas de eficiencia energética simples como mejor aislación, trampas de calor y quemadores más eficientes
- Muy confiables ya que son producidos por los principales fabricantes.

### 3.1.2. Sistemas a gas sin almacenamiento

Estos sistemas presentan mejor eficiencia que los sistemas con almacenamiento ya que eliminan las pérdidas relacionadas con el almacenamiento del agua y por lo tanto pueden lograr eficiencias mayores (normalmente  $EF=0,82$ ). La eficiencia se ve muy afectada por el perfil de demanda ya que hay pérdidas entre los episodios de demanda. Además, estos sistemas requieren un flujo mínimo antes de prender el quemador de gas y una vez que este se prende debe llegar al punto de operación. Esto genera pérdidas asociadas a llevar el calentador a su temperatura cada vez que se demanda agua, y resultan muy significativas si se demandan pequeñas cantidades muchas veces a lo largo del día [13, 10, 28].

Un problema de confort que no impacta en la eficiencia del sistema que estos sistemas presentan, es el denominado sándwich de agua fría que ocurre entre dos demandas juntas de agua caliente, como por ejemplo dos duchas seguidas. Después de la primera demanda, todavía existe agua caliente en la cañería pero el sistema se ha apagado ya que no hay demanda de agua. Al empezar la segunda demanda sale agua caliente de los caños pero seguido de agua fría hasta que el calentador se prende.

Esto genera un impacto en el confort ya que la persona recibe agua fría pero puede ser tenido en cuenta y evitarse una vez que se conoce [13].

Se puede observar en la Figura 9 una representación esquemática de un sistema a gas sin almacenamiento.

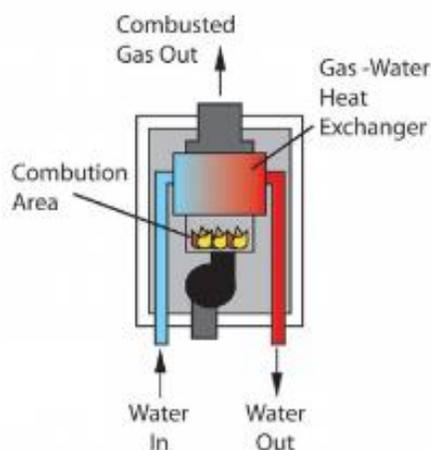


Figura 9. Esquema de sistema a gas sin almacenamiento (instantáneo) [32].

Presentan como ventajas adicionales que ahorran espacio y nunca se quedan sin agua caliente. No presentan posibilidad de inundación por ruptura del tanque y duran el doble que una unidad convencional (hasta 20 años). Son mejores para construcciones nuevas porque presentan extra costos de instalación cuando se instalan en sistemas ya existentes ya que pueden necesitar la instalación de cañerías de gas y de venteo más grandes aumentando así el costo final del cambio de equipo [16, 28]. Es importante tener en cuenta que se debe respetar las indicaciones de instalación y operación del fabricante y de las normativas aplicables para evitar problemas de seguridad.

Se ha reportado en USA que los sistemas instantáneos a gas pueden lograr una reducción en la energía consumida de entre 22 y 54% en comparación con los sistemas de almacenamiento. Sin embargo, el alto costo de instalación y por ende el periodo de payback largo los hace indeseables económicamente. A pesar de que se ven limitados por lo mencionado anteriormente, han tenido una muy alta penetración en el mercado. También, requieren de mantenimiento regular para remover cualquier incrustación que pueda formarse en el interior del intercambiador de calor, especialmente en lugares donde haya agua dura. Aunque existen ciertas diferencias en que tan serio es este problema y si se debe realmente hacer este mantenimiento [28, 32]

Los sistemas de calentamiento a gas sin almacenamiento certificados Energy Star son normalmente 8% más eficientes que los modelos estándar [16].

### 3.1.3. *Sistemas a gas con almacenamiento y condensación*

Estos sistemas mejoran la eficiencia de los equipos al permitir que el vapor de agua presente en los humos de escape condense antes de ser venteadado. Esta condensación permite que el calor latente del vapor de agua sea capturado incrementando significativamente la eficiencia (normalmente  $EF=0,8$ ). Para evitar la corrosión generada por el condensado ácido se requiere un intercambiador de calor resistente a la corrosión. Estos son hechos normalmente de acero inoxidable e implican un aumento en el costo sustancial. Además, como actualmente estas unidades no son demandadas en altas cantidades, los costos de producción son más altos. Sin embargo, al ventear a menores temperaturas los gases, cañerías de PVC pueden usarse en lugar de metálicas disminuyendo significativamente el costo en nuevas construcciones principalmente. Otro factor que reduce los costos es que permite el venteo hacia el costado pudiendo reducir así el largo de la cañería de venteo [13].

Se puede observar en la Figura 10 una representación esquemática de un sistema a gas con condensación y con almacenamiento.

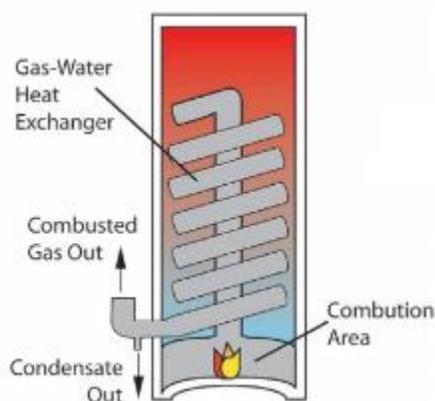


Figura 10. Esquema de sistema a gas con condensación y con almacenamiento [32].

A pesar de que presentan mayor eficiencia, la eficiencia de combustión no es constante ya que depende de la cantidad y la velocidad de condensación en el intercambiador que a su vez depende de la temperatura del agua alrededor del intercambiador. Por último cabe destacar que cómo cualquier tecnología de almacenamiento la eficiencia anual cae significativamente en aplicaciones de poca carga. Esto los hace ideales para aplicaciones residenciales de alto uso como por ejemplo calentamiento de agua y acondicionamiento térmico combinado [13, 28].

### 3.2. Sistemas eléctricos con resistencia con almacenamiento

Estos sistemas son los sistemas eléctricos más comunes pero también son los menos eficientes dentro de los sistemas eléctricos. Presentan mayores eficiencias que los de almacenamiento a gas, con una eficiencia de recuperación típica del 99% y un EF de hasta 0,97 (en USA se requiere un mínimo  $EF=0,90$  para una unidad de 50 galones (189 l)). La eficiencia de conversión de una resistencia eléctrica es muy cercana a 1, por lo que las pérdidas del tanque son la mayor fuente de ineficiencia. Presentan la ventaja de no precisar instalar chimeneas hacia el exterior ni proveer que el ambiente donde se instalan tenga ventilación por lo que reducen las pérdidas del tanque relativo a uno a gas. Al aumentar la aislación se logra aumentar la eficiencia, pero normalmente el costo adicional de aumentar la eficiencia de la unidad es alto en comparación con los ahorros logrados. Tanto los equipos que utilizan resistencias eléctricas con y sin almacenamiento tienen de acuerdo a la Energy Star poco lugar para mejorar los ahorros energéticos. El etiquetado Energy Star no está disponible para estos sistemas debido a que esta etiqueta tiene el objetivo de informar al usuario que un equipo es de alta eficiencia y por lo tanto pide un EF mayor a 2 para equipos eléctricos, lo cual es imposible de alcanzar ya que el límite teórico en estos equipos es 1 [9, 13, 28].

Se puede observar en la Figura 11 una representación esquemática de un sistema eléctrico con almacenamiento para grandes volúmenes de agua donde se observan dos resistencias eléctricas.

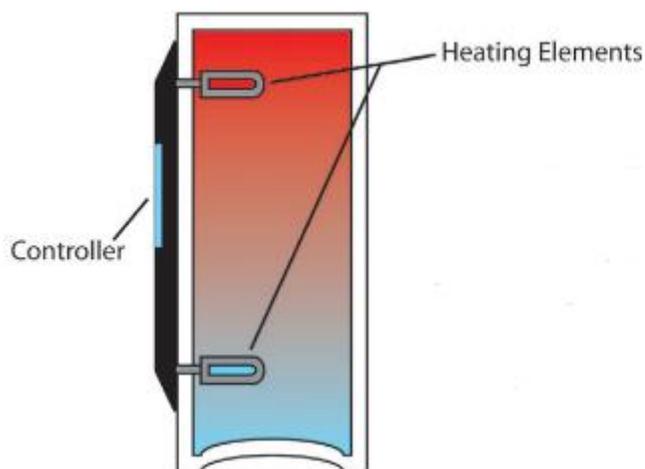


Figura 11. Esquema de sistema eléctrico con almacenamiento [32].

### 3.3. *Sistemas eléctricos con resistencia sin almacenamiento*

Los sistemas eléctricos con resistencia sin almacenamiento (denominados *chuveiro* en Brasil) están compuesto por una resistencia eléctrica inmersa en un recipiente por el cual circula el agua. La resistencia puede o no encontrarse aislada del agua. Cuando se demanda agua caliente el agua realiza presión sobre un diafragma accionando los contactos eléctricos que permiten el pasaje de corriente eléctrica por la resistencia. Debido al efecto Joule la resistencia se calienta transfiriendo calor al agua y elevando así su temperatura. Este proceso presenta eficiencias en torno al 90 a 95%. Existen dispositivos de varias potencias que varían entre 2,2 y 11 kW (normalmente 4,2 kW) y deben entregar una temperatura mínima de 38°C. La mayoría de los modelos poseen la posibilidad de adaptarlos de acuerdo a la estación del año debido al cambio en la temperatura de entrada del agua a lo largo del año, aunque no siempre son suficientes para compensar la reducción en la temperatura por lo que el usuario puede llegar a tener que disminuir el caudal para lograr la temperatura deseada pudiendo generar un impacto en el confort [7, 14]

Se puede observar en la Figura 12 una representación esquemática de un sistema eléctrico sin almacenamiento.

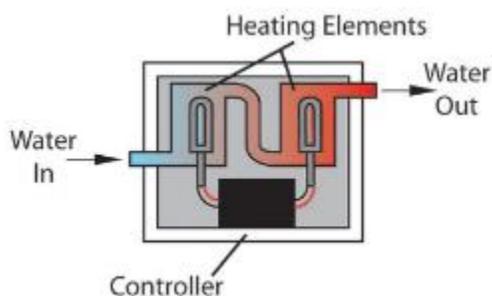


Figura 12. Esquema de sistema eléctrico con almacenamiento [32].

Estos sistemas utilizan una gran potencia para poder lograr calentar el agua en el momento por lo que requieren además un cableado especial debido a la alta cantidad de corriente que utilizan incrementando la demanda local del sistema en las horas pico (ya que coincide con el horario en que una parte importante de la población se ducha), pudiendo generar un problema en el sistema eléctrico [9].

Al igual que los sistemas sin almacenamiento a gas logran disminuir el consumo de energía ya que al no tener tanque de almacenamiento se disminuyen de manera muy significativa las pérdidas al ambiente [9].

### 3.4. Sistemas eléctricos con bomba de calor

Las bombas de calor se encuentran muy comúnmente en heladeras y aires acondicionados. Estas logran remover calor de una fuente fría y bombearlo hacia una fuente más caliente mediante el uso de electricidad. Presentan la ventaja de que pueden reducir el consumo de energía de un 15 a un 50% en comparación con otras alternativas de calentamiento ya que logran aprovechar la energía del aire, agua o la tierra que de otra forma sería inutilizada, en energía térmica altamente utilizable con una pequeña cantidad comparativamente de energía adicionada al ciclo [60, 69, 70].

El principio de funcionamiento operativo es el inverso a una maquina térmica utiliza trabajo mecánico para mover calor en contra del gradiente natural al explotar las propiedades físicas de la evaporación y condensación de un fluido [60].

El sistema consiste en 4 componentes principales [60, 70]:

- El compresor, que aumenta la presión del fluido refrigerante y por lo tanto su temperatura.
- El condensador, que transfiere el calor al fluido que se busca calentar.
- La válvula de expansión, para disminuir la presión y temperatura del fluido.
- El evaporador que recolecta el calor del ambiente.

Cómo se puede apreciar en la Figura 13 el ciclo consiste de 4 etapas [60, 70]:

- Compresión (Etapa 1 de la Figura 13)- El refrigerante evaporado es comprimido isentrópicamente a una presión alta y por lo tanto su temperatura aumenta llevando el gas a un estado sobrecalentado. Para hacer funcionar el compresor se requiere energía adicional que se obtiene normalmente de la electricidad pero también puede ser térmica. Esta energía aportada es alrededor del 25% de la energía total.
- Condensación (Etapa 2 de la Figura 13) - El vapor caliente y de alta presión que sale del compresor pasa por un intercambiador de calor donde condensa y así libera la energía que contiene el fluido. Libera el calor sensible y luego el calor latente a presión constante.
- Expansión (Etapa 3 de la Figura 13) - El refrigerante condensado pasa por una válvula de expansión que disminuye la presión para que pueda ir al evaporador. Al disminuir la presión abruptamente el refrigerante en estado líquido toma calor y flashea convirtiéndose en vapor dejando una mezcla líquido vapor.
- Evaporación (Etapa 4 de la Figura 13) - El sistema toma calor del ambiente ya sea del aire, la tierra o agua para evaporar el fluido refrigerante. Estas fuentes de calor se consideran infinitas y renovables y el calor que se retira es aproximadamente el 75% del calor entregado por la bomba de calor. Si bien las fuentes están a baja temperatura, está es suficiente para evaporar el fluido refrigerante debido a que presentan un punto de ebullición bajo.

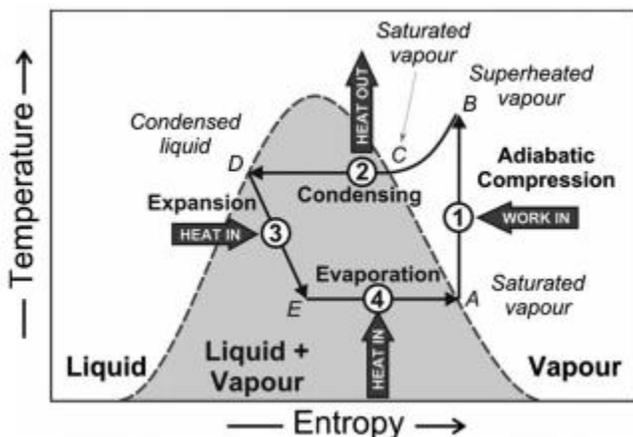


Figura 13. Diagrama temperatura entropía que muestra el ciclo de ideal de una bomba de calor [60].

El compresor es el componente más significativo en términos de tamaño, costo y consumo de energía. La mayoría de los compresores más básicos pueden operar a una velocidad fija por lo que sólo pueden operar a potencia máxima y deben prenderse y apagarse constantemente para mantener la temperatura requerida. Este proceso de prendido y apagado constante impacta en la eficiencia del equipo y lleva a que se pase de la temperatura requerida. Además, tiene un alto impacto en la vida útil del equipo. Este diseño básico ha sufrido varios cambios donde se ha logrado mejorar la eficiencia de los equipos a un ritmo consistente de 1% por año a lo largo de las últimas 2 décadas. La tecnología inverter ha mejorado la eficiencia y el confort en el caso de los aires acondicionados al permitir que se varíe la velocidad del compresor. Esto permite reducir la potencia de salida al nivel deseado y por lo tanto controlar precisamente la temperatura de salida. Los equipos inverter presentan ahorros de 30 a 45% en comparación con los equipos de velocidad fija pero también tienen un impacto similar en el precio del equipo [60].

La eficiencia de la bomba de calor es el factor crucial para determinar los ahorros que puede ofrecer. Se mide comúnmente con la medida de calor producido sobre la electricidad consumida. Estrictamente este valor no puede denominarse eficiencia ya que no tiene en cuenta la cantidad de calor tomada del ambiente, pero cómo este calor es “gratis”, no tiene emisiones y es infinito, este valor es sólo para la termodinámica del sistema. Debido a esto es que se le llama Coeficiente de performance (COP) en vez de eficiencia. También existe el Factor de performance estacional (SPF) que es una medida diferente y busca representar la performance anual promedio para una ubicación dada, basándose en la temperatura exterior promedio a lo largo del año. El COP es reproducible y comparable entre marcas pero el SPF va a depender de la ubicación y el clima considerado en las distintas pruebas [60]. Se pueden definir 2 COPs, el COP de la bomba de calor que tiene en cuenta la performance sólo de la bomba de calor y el COP del sistema que tiene en cuenta además las pérdidas en standby. El COP de la bomba de calor depende fuertemente de la temperatura del agua adyacente al condensador, la temperatura y humedad del aire ambiente, la temperatura seteadas, el perfil de demanda de agua y el modo de operación. Todos estos factores hacen que la eficiencia varíe ampliamente [13].

La performance de una bomba de calor se ve influenciada por:

- La temperatura externa del aire o la tierra.
- La temperatura de salida.

Debido a que la performance decae con la diferencia de temperatura entre el exterior y la temperatura de salida, se estima que en la práctica el COP cae entre 0,6 y 1 por cada 10 °C de diferencia. Por lo cual para lograr la mayor eficiencia se debe hacer estas temperaturas lo más parecidas posible. Se debe tener cuidado con los COPs informados ya que se pueden promover equipos con COPs de 7 pero estos sólo pueden lograrse con diferencias de temperatura muy chicas y no se logran prácticamente en el uso normal del equipo [60]. Se ha documentado que al decaer la temperatura por debajo de 15 °C y hasta 4 °C el COP decae a valores menores a 2. Equipos que operan bajo temperaturas de aire menores a 4 °C deben tener sistemas preparados para el congelamiento ya que se genera hielo que aumenta la resistencia térmica y la pérdida de presión a lo largo del intercambiador. Esto también reduce el flujo de aire y por lo tanto el intercambio de calor en el evaporador causando una caída en la capacidad de calentamiento, problemas mecánicos potenciales y pueden llevar a que el sistema se apague. Cómo las bajas temperaturas del aire tienen un impacto negativo en el rendimiento del equipo, el tiempo de operación óptimo debe ajustarse a las horas donde la temperatura sea la más alta. Estas temperaturas se relacionan normalmente a las horas del mediodía y primeras horas de la tarde. Se ha reportado que manteniendo el equipo funcionando en esas horas se puede lograr mantener el COP en valores de 2,8 a 5,5 [69].

Por décadas el refrigerante R22 fue el más utilizado en las bombas de calor pero en el 2000 fue removido debido al impacto que tiene en la capa de ozono y el calentamiento global. Como resultado otras mezclas de hidroflocarbonos como el R134a y el R410a han sido adoptados como reemplazos. La utilización de R134a se asocia comúnmente con un aumento del 25% en el COP comparado con el R22 y dependiendo del diseño del sistema el R410a puede obtener mejores COPs que algunos sistemas con R134a. Ambos presentan ciertas limitaciones adicionales, el R134a tiene capacidad limitada para el calentamiento y relativamente alto costo debido a los cambios necesarios en el sistema para prevenir las fugas. El costo de reciclaje también es bastante alto. El R410a necesita operar a alta presión y esto puede causar vibraciones y ruido. Últimamente se está trabajando en CO<sub>2</sub> transcrito como refrigerante (R744) y este ha reportado que con optimización de la estratificación dentro del tanque de agua se puede obtener un COP de 4 a 4,9 en invierno y de 7 a 9 en verano. Presentan el problema de que tienen un muy alto costo de producción [69].

Los calentadores de agua que utilizan bombas de calor son significativamente más eficientes<sup>2</sup> que los sistemas eléctricos que utilizan resistencia y presentan un EF = 2-2,5 normalmente. Los sistemas más comunes utilizan el aire ambiente para remover calor y entregarlo al agua, sino también existen sistemas que intercambian el calor a través de un intercambiador de calor enterrado en el suelo. El EF es equivalente al COP del sistema para las condiciones de testeo [13].

Se ha reportado en estudios llevados a cabo en USA y Nueva Zelanda que para un sistema de 50 galones se consume alrededor de un 55 a 70% menos energía que un estándar que utiliza resistencia

---

<sup>2</sup> En el sentido de eficiencia de segunda ley, comparando el consumo con el de un sistema ideal sin irreversibilidades.

eléctrica para el calentamiento. Sin embargo, lo más común es encontrar ahorros de 40 a 60% en la práctica. [69, 71].

Los sistemas de calentamiento de agua comúnmente se componen de una bomba de calor y además al menos una resistencia eléctrica para calentamiento. Esta resistencia sólo se prende en los casos donde la bomba de calor no puede proveer la cantidad de agua caliente necesaria (debido a que entregan menor potencia calórica) o las condiciones ambientales impiden que la bomba pueda funcionar. Los calentadores de inmersión eléctricos son los más utilizados como sistemas de respaldo debido a su simplicidad y bajo costo pero su ineficiencia puede aumentar significativamente el costo de utilización si son usados regularmente. Cada fabricante presenta su lógica de control para determinar cuándo se prende la resistencia de respaldo y el uso de esta resistencia depende fuertemente del clima y la demanda de agua. Para cuantificarlo se puede usar una métrica de fracción de bomba de calor análoga a la fracción solar (cantidad de energía entregada por el CSA versus la energía total demandada) [13, 28, 60, 69].

Normalmente, como se comentó anteriormente muchos sistemas presentan el problema de que una vez que la temperatura del aire cae debajo de un cierto valor que suele depender de la configuración y el refrigerante (alrededor de 0 °C) la bomba de calor ya no puede extraer calor significativo y se debe utilizar la resistencia eléctrica para el calentamiento. Esto se debe a que el condensador debe pasar por ciclos de descongelamiento para poder eliminar el hielo acumulado y esto disminuye mucho la eficiencia del ciclo. Además, es común que las bombas de calor se subdimensionen en relación a la demanda pico para así reducir los costos de capital y aumentar la utilización, por lo cual es debido a esta razón que los sistemas vienen con calentador de respaldo para proveer la cantidad necesaria de calor en los días más fríos del año. La mayoría de los sistemas no pueden proveer calor a mayores temperaturas de 60 C y el sistema de respaldo sirve también para lograr temperaturas más altas [71, 60]. Resultados experimentales indican que la performance del sistema puede mejorarse significativamente al disminuir la velocidad del compresor a medida que la temperatura aumenta desde el invierno al verano [71].

Se puede observar en la Figura 14 una representación esquemática de un sistema eléctrico con bomba de calor para el calentamiento de agua que presenta tres grandes componentes [32, 69, 71]:

- La bomba de calor, que consiste en evaporador, condensador, compresor y válvula de expansión.
- Elementos eléctricos de respaldo.
- Un tanque de agua para almacenamiento envuelto en material aislante para disminuir las pérdidas.

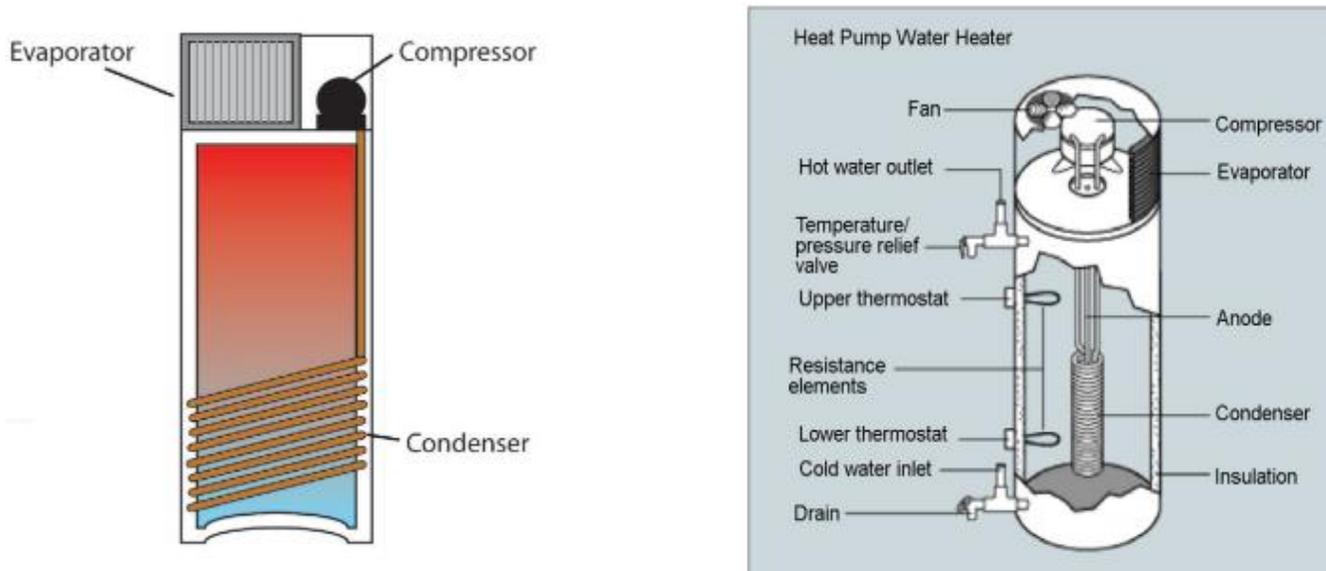


Figura 14. Esquema de sistema eléctrico con bomba de calor [32, 69, 71].

Las bombas de calor presentan una vida útil mayor que las calderas convencionales y una mínima necesidad de mantenimiento ya que además de malfuncionamiento de algún componente el equipo sólo requiere mantenimiento cuando la capacidad de calentamiento o enfriamiento es baja debido a una fuga de refrigerante. El compresor es el componente más complejo y caro, presenta generalmente una vida útil de 15-25 años [60].

En la instalación debe tenerse en cuenta que se requiere un lugar con suficiente flujo de aire y un volumen de aire suficiente para asegurar que no se recircule el aire frío que sale de la bomba de calor, ya que esto causaría que la eficiencia disminuyera. Estos sistemas van a enfriar y deshumidificar el aire del ambiente en donde se encuentran y por lo tanto se debe tener en cuenta el impacto que generan en el acondicionamiento térmico [13, 28, 69]. Comúnmente se instalan en el exterior pero podrían ser instaladas en el interior en garajes o sótanos bien ventilados.

Los sistemas de calentamiento con bombas de calor certificados Energy Star son normalmente 50% más eficientes que los modelos estándar [16]. Keinath & Garimella (2017) han reportado ahorros energéticos promedio obtenidos por los consumidores de un 55%. También, reportaron que con el uso de bombas de calor no aumentaron los períodos de desabastecimiento de agua caliente como se esperaba en una primera instancia, siendo un desabastecimiento definido como una demanda que llevará a que el agua saliera del sistema a una temperatura de 40 °C o menor [32].

El mercado de las bombas de calor continúa gobernado por 3 grandes tendencias [69, 71]:

- El aire es y seguirá siendo la fuente de energía dominante.
- El agua caliente para uso sanitario es el segmento de mayor crecimiento en Europa. Está categoría es la única con crecimiento de dos dígitos.
- Las bombas de calor grandes para usos comerciales, industriales y aplicaciones de calefacción están aumentando su popularidad.

Estos sistemas han tenido en Japón un gran mercado donde algunos sistemas que utilizan CO<sub>2</sub> como refrigerante han logrado un COP de 4 o mayor, pero en el resto del mundo tienen poca penetración en el mercado a pesar de que están disponibles hace bastantes años, principalmente debido al alto costo inicial. A pesar de los costos varían significativamente en el tiempo, estos sistemas pueden costar 2 a 3 veces más que un sistema eléctrico de almacenamiento común (calefón). Otra barrera a la entrada de estos equipos es la percepción de la gente sobre que presentan problemas de confiabilidad. Esta percepción proviene de programas piloto que utilizaban los primeros equipos residenciales y aunque los problemas técnicos han sido solucionados, la percepción de que son poco confiables aún permanece en las personas que se enteraron del programa piloto. Además, hasta hace poco tiempo los equipos eran producidos por fabricantes pequeños haciendo difícil que pudieran abastecer una gran demanda. Hoy en día varios grandes proveedores como General Electric, Rheem, y A. O. Smith han ingresado al mercado y producen equipos certificados Energy Star [28].

### 3.5. Calentadores Solares de Agua

Un colector solar absorbe la energía proveniente de la radiación solar y la convierte en calor que es absorbido por un fluido que pasa por el colector. Este calor puede utilizarse o almacenarse para su uso posterior en un tanque de almacenamiento [68].

Los CSA proveen normalmente alrededor de la mitad de la energía requerida por el hogar mientras que un calentador de respaldo debe proveer la energía remanente. Este sistema de respaldo puede ser cualquier sistema incluyendo sistemas de condensación o bombas de calor. Existen muchos tipos de colectores solares que pueden usarse para el calentamiento de agua residencial pero los dos tipos más comunes a nivel mundial son los de placa plana y los de tubos evacuados. Existen también sistemas que tienen el almacenamiento integrado en el colector y se denomina a estos sistemas comúnmente colectores de sistema integrado de almacenamiento (ICS) [28].

Dentro de los colectores de placa plana existen colectores que no presentan cobertura transparente por lo que el sol impacta directamente sobre la superficie del absorbedor y de esta manera no se pierde parte de la energía por reflexión en la cobertura. Sin embargo, sólo se utilizan para aplicaciones con diferencias de temperatura pequeñas respecto al ambiente como por ejemplo para piscinas. Normalmente se utilizan con cobertura transparente que les provee una aislación extra pero incrementa las pérdidas por reflexión [68].

Debido a su menor complejidad, mantenimiento y que se ajusta mejor a la demanda de los hogares los colectores planos son la alternativa más común en las aplicaciones residenciales. Como se puede ver en la Figura 15, en los colectores planos, la energía solar pasa a través de una cobertura de vidrio y llega a la placa metálica. Esta placa está hecha de un material altamente conductor como cobre o aluminio y pintada de negro o una pintura selectiva que absorba en el visible y no emita en el infrarrojo. Una buena placa absorbe hasta un 96% de la luz solar incidente. El calor es después conducido a un fluido que circula por un tubo en contacto con la placa metálica. El agua es el fluido ideal ya que presenta una alta conductividad térmica y una alta viscosidad. Sin embargo, en climas fríos se utiliza una mezcla de agua con propilenglicol (no así el etilenglicol que es tóxico) para prevenir la congelación del agua dentro del sistema. Se debe aislar la parte de abajo y los costados de la unidad para evitar pérdidas de calor al ambiente [24, 28]

Se puede observar en la Figura 15 una representación esquemática de un colector de placa plana.

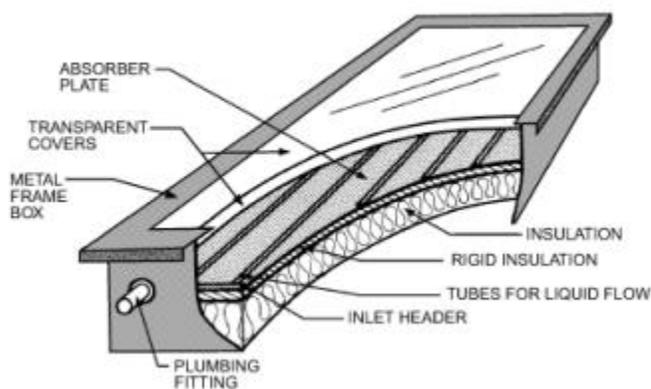


Figura 15. Esquema de un colector de placa plana típico [28].

Como se puede apreciar en la Figura 16 los colectores de tubo evacuado consisten de varias superficies de absorción con un fluido que fluye a través del tubo encapsulado al vacío para luego transferir el calor. El vacío minimiza las pérdidas al ambiente ya que reduce drásticamente las pérdidas por conducción y convección del sistema dejando como único mecanismo a la radiación. Esto los hace más complicados de fabricar que los colectores planos pero permite su utilización en aplicaciones de alta temperatura y climas fríos [28, 68].

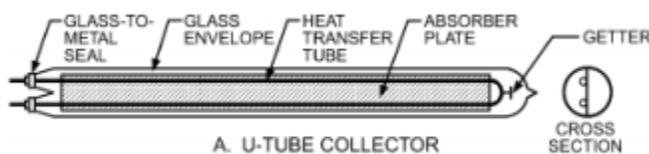


Figura 16. Esquema de un tubo evacuado típico [28].

La decisión de qué tipo de colector utilizar depende de la temperatura de entrada del fluido, que a su vez depende de la temperatura ambiente, la intensidad de la radiación solar incidente y la temperatura de salida del agua deseada. Para las temperaturas utilizadas a nivel residencial, los colectores planos son más eficientes aunque para aplicaciones donde se requiere mayores temperaturas de salida (aplicaciones comerciales o industriales) los de tubos evacuados son más eficientes. También se utilizan los de tubos evacuados cuando la temperatura ambiente y la irradiación son bajas como por ejemplo en zonas muy frías del planeta [28].

Generalmente se diferencia la configuración de los sistemas principalmente de acuerdo a si son sistemas [24, 68]:

- Directos (sistema abierto) o indirectos (sistema cerrado), dependiendo de si el fluido calentado es el mismo que se va a utilizar o es un fluido intermedio.
  - En un sistema abierto, el agua es calentada en el colector y almacenada en el tanque para uso directo. Estos sistemas presentan problemas debido a incrustaciones que pueden generarse en los caños y el sistema tampoco puede soportar condiciones de congelamiento.
  - En un sistema cerrado, se utiliza como fluido de intercambio en el colector un fluido con un punto de congelamiento bajo, comúnmente una mezcla de agua y propilen glicol. Este sistema necesita un intercambiador de calor adicional para transferir calor al agua del tanque por lo que hace al sistema ligeramente menos eficiente aunque evita que se congele y se incruste el sistema.
- Forzados o termosifónicos, dependiendo de si el fluido es movido por una bomba (forzados) o naturalmente debido a la disminución de la densidad del fluido una vez que la temperatura se incrementa y el fluido circula por convección natural. Se debe tener en cuenta que sí la calidad del agua es mala (especialmente en sistemas directos) los sistemas termosifónicos pueden taparse reduciendo el flujo pero presentan la ventaja de no necesitar bombas ni controladores por lo que son más confiables y duran más tiempo. Además, estos sistemas presentan retos prácticos ya que el tanque de almacenamiento debe encontrarse arriba del colector y es más susceptible a condiciones de congelamiento.

La performance de un CSA y por lo tanto la habilidad para reemplazar las fuentes de energía convencionales depende de la eficiencia del colector (la capacidad de convertir la luz solar a calor en el absorbedor) y de la habilidad del sistema para transferir y almacenar el calor con pérdidas mínimas. Para reducir las pérdidas al ambiente es necesario aislar, especialmente cuando las temperaturas de trabajo son altas. Como en todas las tecnologías solares, la performance es altamente dependiente de la cantidad de radiación solar que recibe el colector. Esta se encuentra mayormente determinada por la latitud, la posición del colector y las condiciones climáticas [24, 68].

En el sistema CSA se deben considerar componentes adicionales a los colectores, como bombas (en caso de sistemas forzados), un tanque de almacenamiento, una fuente de energía auxiliar y un controlador [24].

El almacenamiento tiene una enorme influencia en el costo del sistema, el rendimiento y la confiabilidad ya que tiene como objetivo mejorar la utilización de la energía obtenida y mejorar la eficiencia del sistema al impedir que el fluido de transferencia llegue a altas temperaturas. El tamaño del tanque de almacenamiento se elige para suplir las necesidades del hogar (en función de la cantidad de habitantes del mismo). Así mismo, existe una relación con el área de captación del colector de tal forma que el agua almacenada supere la temperatura de demanda pero no demasiado para evitar el incremento de las pérdidas al ambiente. Para transportar el calor del colector al almacenamiento se requiere un medio que no se congele o evapore, debe tener baja viscosidad, alto calor específico, ser no tóxico, barato y abundante. Debido a estos factores es que además del agua como ya fue mencionada se utiliza aire o aceites. Generalmente el agua es el fluido más utilizado para almacenamiento debido a que es barato, no es tóxico y tiene alta capacidad calorífica. Además, de que

al utilizar el agua directamente se puede llegar a prescindir de un intercambiador extra pero debe tenerse en cuenta el riesgo de congelamiento. Las cañerías deben ser lo más cortas posibles para disminuir las pérdidas de calor [68].

A modo de ejemplo, se reportó en Canadá que para un sistema de 6 m<sup>2</sup> con cobertura simple y plano, orientado de forma óptima y conectado a través de un sistema cerrado a 2 tanques de 270 litros logro ahorros de entre 21 y 53% dependiendo de la época del año. Se podrían lograr ahorros mayores en energía si se incrementara el área de los colectores pero el beneficio económico se podría ver afectado ya que la inversión sería mayor también [24].

Los CSA tienen mucho potencial especialmente para las siguientes tres categorías de países [19]:

- Países que dependen de gas o petróleo importado para cubrir sus necesidades de calentamiento.
- Países con economías en crecimiento donde el uso de calderas eléctricas (calefones) para el calentamiento de agua obligan a la expansión de los sistemas eléctricos para satisfacer la demanda eléctrica.
- Países con alta demanda de enfriamiento durante horas de sol.

Los CSA son una tecnología relativamente simple y en muchos países los fabricantes locales, que normalmente son empresas chicas o medianas, producen, instalan y mantienen los equipos. Muchos países han desarrollado la capacidad de producción local exitosamente y de esta forma generando empleos y estimulando el desarrollo económico. Debido a esta gran cantidad de fabricantes es que el precio y la calidad de los sistemas varían sustancialmente de país a país. Por ejemplo, un sistema termosifónico para agua caliente sanitaria chino es casi 10 veces más barato que un americano pero generalmente la vida útil también es menor (en algunos casos menos de la mitad) [19].

Debido al estancamiento o saturación de los mercados nacionales, muchos fabricantes están vendiendo su producto en el exterior, logrando un mercado internacional de CSA. En este contexto es que estándares internacionales y certificaciones para el aseguramiento de la calidad van a ser clave en el desarrollo. ISO ya ha desarrollado estándares de testeo de performance y durabilidad [19].

Los principales desafíos que impiden un mayor desarrollo de los CSA son [19, 28]:

- Para países desarrollados, el alto costo inicial de instalación comparado con tecnologías convencionales bien conocidas como calentadores eléctricos o a gas. Los equipos pueden costar más del doble inclusive después de tener en cuenta los incentivos fiscales.
- El proceso más complejo y costos asociados de integrar los sistemas solares a los ya existentes en los hogares. Estos sistemas necesitan montarse en el techo y disponer de una orientación apropiada (hacia el sur en el hemisferio Norte y hacia el Norte en el hemisferio Sur) y que no presente sombras en la mayor parte del año. Estos factores limitan aún más su consideración.
- La competencia con bombas de calor por el servicio y con los paneles fotovoltaicos por el espacio en el techo.
- Falta de marcos regulatorios apropiados para garantizar que los equipos cumplan los requerimientos técnicos para asegurar una operación apropiada y confiable.

- Inercia de los usuarios para seguir con los sistemas convencionales.
- La falta de conocimiento de las capacidades de los equipos entre los arquitectos y las constructoras.

Se ha visto que los CSA han sido muy exitosos en países donde los gobiernos han obligado su uso en construcciones nuevas y de esta forma derribando muchas barreras existentes [19].

La competitividad de los costos está definido por tres factores principales:

- El costo inicial del sistema solar
- Mantenimiento apropiado
- El precio de las alternativas

A pesar de que los costos varían significativamente año a año, el costo del equipo varía por un factor de 3 a 10 entre los distintos países y depende fuertemente de la calidad del equipo, el costo de la mano de obra y las condiciones climáticas locales. Se estima que en USA el costo de los CSA debe disminuir por un factor de 3 a 5 para convertirse en atractivos económicamente en comparación con sistemas a gas. Sin embargo, en el sur y centro de Europa el costo de los CSA ya es más barato que las alternativas eléctricas y a gas [19].

Los CSA normalmente operan en un rango de temperaturas de entre 20 y 90°C y pueden reducir el consumo energético en un 50 a 70%. Pero se debe tener en cuenta que como los colectores solares pueden llegar a temperaturas cercanas a los 100°C estos deben templar el agua mediante una válvula con el agua de entrada o un tanque secundario de almacenamiento para poder entregar el agua a una temperatura de distribución adecuada evitando correr riesgos al distribuir agua a una temperatura alta [19, 29].

Por ultimo cabe destacar que los equipos de respaldo que se requieren de apoyo para días con nubosidad que impiden el calentamiento suficiente del agua por parte del CSA deben diseñarse adecuadamente para controlar los consumos de standby. Sí no se dimensionan correctamente estos sistemas híbridos pueden llegar a consumir más que un equipo convencional. Un ejemplo de esto es utilizar un CSA con un sistema Clase E de respaldo vs usar un sistema Clase A [10].



## 4. PERFORMANCE Y COSTO

### 4.1. Performance

La performance de un calentador de agua puede medirse con una variedad de métricas [5, 9]:

- Eficiencia – Provee una medida de la cantidad de energía útil que entrega sobre la energía que se le aporta expresada generalmente como porcentaje.
- Capacidad nominal – Refiere a la salida de energía por unidad de tiempo que puede entregar el dispositivo bajo ciertas condiciones estándar
- Tasa de Flujo – Provee una medida del máximo flujo que puede entregar para un incremento en la temperatura específico (generalmente 45°C). Es utilizada generalmente para sistemas instantáneos.
- Factor de Energía (EF) – Es una medida de eficiencia global del calentador incluyendo la eficiencia de recuperación y las pérdidas en standby. Es el cociente de energía útil de salida sobre energía consumida. Puede exceder el valor de 1 al utilizar renovables y bombas de calor. Es la más comúnmente utilizada en USA.
- Tasa de consumo – Se puede expresar como energía por unidad de tiempo y típicamente se utiliza kWh/año para considerar variaciones estacionales.
- Vida útil efectiva – Expresa la vida útil promedio de un producto en condiciones típicas de operación. Existe una gran variabilidad dentro de los productos pero el promedio para Europa se encuentra en los 15 años.

El Factor de Energía (EF) se obtiene a partir de una prueba donde se utiliza el consumo de energía de un día representativo. De esta forma se pueden comparar así distintas tecnologías de calentamiento de agua. Los sistemas de calentamiento directo están limitados a un EF de 1 o menos y han estado acercándose a este límite teórico desde hace un tiempo. El EF es uno de los factores que se considera a la hora de puntuar un sistema para obtener un certificado Energy Star ya que indica el valor mínimo que la unidad debe tener [32].

Además del EF, índices específicos para cada tecnología han sido desarrollados para permitir una correcta comparación. El índice de la primer hora (FHR) se utiliza para sistemas con almacenamiento, es el máximo volumen de agua caliente que un tanque de almacenamiento de agua puede proveer dentro de una hora donde el tanque está inicialmente totalmente caliente. Para los sistemas instantáneos se utiliza los litros por minuto (LPM), que indica el máximo caudal que puede mantener el sistema con un aumento de temperatura de 45 °C. El Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos utiliza estas pruebas para comparar tecnologías. Por ejemplo, para que un sistema eléctrico con almacenamiento pueda tener un certificado Energy Star, debe presentar un mínimo EF de 2 y un mínimo FHR de 189 L/h. Esto deja a los calefones fuera de las especificaciones mínimas y por lo tanto no pueden tener certificado Energy Star. Para un sistema a gas con almacenamiento, debe presentar un mínimo EF de 0,67 y un mínimo FHR de 254 L/h. Para sistemas a gas instantáneos, debe presentar un mínimo EF de 0,82 y un mínimo LPM de 9,5 L/min [32].

Los sistemas con almacenamiento mantienen una cantidad de agua caliente constante y por lo tanto están sujetos a pérdidas significativas de calor al ambiente, mientras que los sistemas instantáneos se ven limitados por la habilidad para entregar grandes flujos en múltiples escenarios de consumo. Las eficiencias en la vida real difieren de las nominales debido a las pérdidas de standby y las pérdidas en las cañerías. Estas pueden disminuirse con una correcta aislación y el comportamiento de consumo por parte de los usuarios. Los factores clave que influyen en esto último son la cantidad de personas que lo utilizan, frecuencia, duración y cuando se utiliza en el día [5].

#### 4.2. *Payback*

La curva de aceptación residencial de la Figura 17 muestra el porcentaje de personas dispuestas a hacer una inversión para un payback dado. Un pequeño porcentaje de la gente estaría dispuesta a realizar una inversión que tenga un payback largo mientras que un alto porcentaje de gente estaría dispuesta a realizarla si el payback es corto. La aceptación de un cierto payback depende de las condiciones sociales, económicas y ambientales de las personas y por lo tanto evoluciona de acuerdo a las tendencias de la sociedad. Mediante esta curva se puede estimar el payback requerido para obtener el nivel de retorno deseado por los hogares. Esta curva fue usada para comparar distintas tecnologías de calentamiento de agua [24].

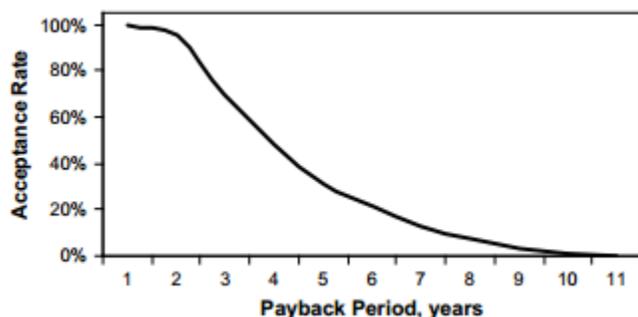


Figura 17. Curva de aceptación residencial vs payback para tecnologías que realizan ahorros energéticos [24].

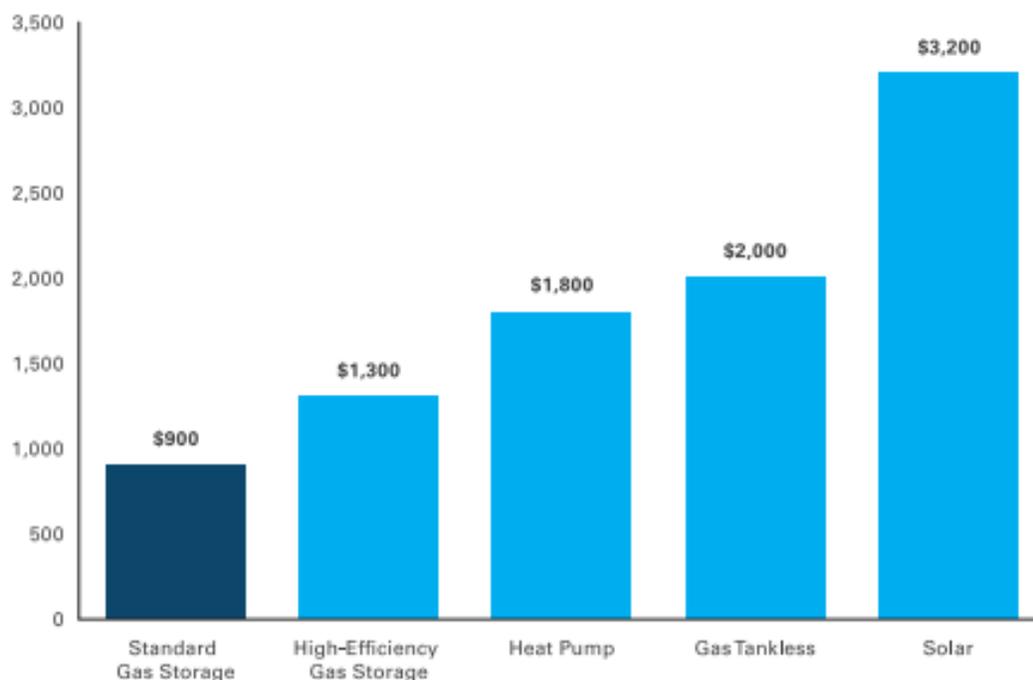
La viabilidad económica es una consideración importante durante la evaluación de una nueva tecnología pero primero el consumidor debe concientizarse e interesarse en la nueva tecnología. Debido a esto es que existen 5 etapas en el proceso de adopción de nuevas tecnologías [24]:

- Concientización
- Interés
- Evaluación
- Ensayo
- Adopción

Por ejemplo, en muchos lugares, los CSA han estado disponibles desde hace pocos años en el mercado por lo que la conciencia no se encuentra difundida en la población. Luego, la información se encuentra disponible en proveedores y gobiernos pero la evolución es todavía difícil. A diferencia de las energías renovables en gran escala como la eólica que requieren solamente una aprobación pasiva de la comunidad, las tecnologías residenciales necesitan que una gran cantidad de los miembros de la comunidad inviertan en la tecnología directamente para poder ensayarla y así transmitir el conocimiento y la experiencia de la situación a otros miembros de la comunidad. Esto simplifica la adopción de la tecnología de nuevos hogares. Por último, cabe destacar que es importante que las experiencias iniciales con la nueva tecnología sean positivas ya que experiencias negativas pueden reducir fuertemente la adopción de la tecnología [24].

### 4.3. Costos

Primero que nada se debe destacar que los costos varían significativamente año a año. En la Figura 18 y la Tabla 7 se pueden observar los costos típicos para cada tecnología correspondientes a Estados Unidos. Este costo tiene en consideración el costo del equipo y también el costo de instalación [25].



Note: Installed cost is equal to cost of equipment plus installation.

Figura 18. Costos típicos de instalación en USA [25].

Tabla 7. Costos aproximados en USA para los distintos sistemas [28].

Sistema	Costo (USD)
Acumulación eléctrico	470 - 750
Acumulación a gas	620 – 890
Bomba de calor	1300 – 1800
Instantáneo a gas	1500 - 2500
CSA*	2000 - 3500

\*Luego de los créditos impositivos federales.

#### 4.4. Vida útil

En la Tabla 8 se pueden apreciar para Brasil las vidas útiles para los distintos sistemas considerados. La vida útil de los equipos depende de las condiciones de uso y mantenimiento. Los instantáneos eléctricos tienen una durabilidad de 3300 operaciones (aprox 2 años) si son comunes y de 12000 operaciones (aprox 8 años) si son blindados [15].

Tabla 8. Vida útil promedio en Brasil para los distintos sistemas [15].

Sistema	Vida útil (años)
Acumulación eléctrico	10
Acumulación a gas	8
Instantáneo a gas	10
Instantáneo eléctrico (chuveiro)	2 - 8

La vida útil de un sistema de calentamiento de agua se encuentra normalmente entre 10 y 15 años (en promedio 13 años), lo que hace que sea aún más importante que los equipos más eficientes se encuentren disponibles y difundidos debido a que la oportunidad de cambiarlos es infrecuente. Para lograr hacerlo 2 encares se deberían seguir, primero debe fomentarse el uso de equipos Energy Star ya existentes y segundo se necesita el desarrollo y la comercialización de nuevos equipos calificados Energy Star. La combinación de ambas va a llevar a que más equipos eficientes se encuentren disponibles para los consumidores y de esta forma se aumenta la cuota de mercado. No debe pasarse por alto que la vida útil depende de una gran cantidad de factores que incluyen, el tipo de sistema, la dureza del agua y el mantenimiento recibido por la unidad [25, 32].

Maguirre (2012) reporta como vida útil promedio en USA los valores que se pueden observar en la Tabla 9 [28].

Tabla 9. Vida útil promedio en USA para los distintos sistemas [28].

Sistema	Vida Útil (años)
Acumulación eléctrico	13
Acumulación a gas	13
Instantáneo a gas	20
Bomba de calor	10
CSA	20

#### 4.5. Eficiencias

En la Tabla 10 se pueden ver las eficiencias de los equipos adoptados por el Ministerio de Energía de Brasil [15].

Tabla 10. Eficiencias promedio en Brasil de los equipos [15].

Sistema	Eficiencia
Acumulación eléctrico	85%
Acumulación a gas	70%
Instantáneo a gas	72%
Instantáneo eléctrico (chuveiro)	95%

En la Tabla 11 se pueden observar los EFs mínimos que se necesitan cumplir para obtener un certificado Energy Star. Para los equipos con almacenamiento, esta norma discrimina si el sistema es mayor o menor a 55 galones (208 litros) y demanda que para los equipos de más capacidad la eficiencia sea aún mayor [16].

Tabla 11. EFs mínimos permitidos para los equipos certificados Energy Star [16].

Type	ENERGY STAR specification
Electric Heat Pump	≤ 55 gallons: EF ≥ 2.00 > 55 gallons: EF ≥ 2.20
Gas Storage	≤ 55 gallons: EF ≥ 0.67 > 55 gallons: EF ≥ 0.77
Gas Tankless	EF ≥ 0.90
Solar	SEF ≥ 1.8 for electric backup SEF ≥ 1.2 for gas backup

In order to meet the version 3.0 specification (effective April 14, 2015), all electric storage units must use heat pump technology

Solar Energy Factor (SEF) se refiere a la energía entregada por el sistema solar más el de respaldo divide por el aporte energético al Sistema de respaldo (electricidad o gas).

Maguirre (2012) reporta como EFs típicos en USA los valores que se pueden observar en la Tabla 12 [28].

Tabla 12. EFs típicos en USA para los distintos sistemas [28].

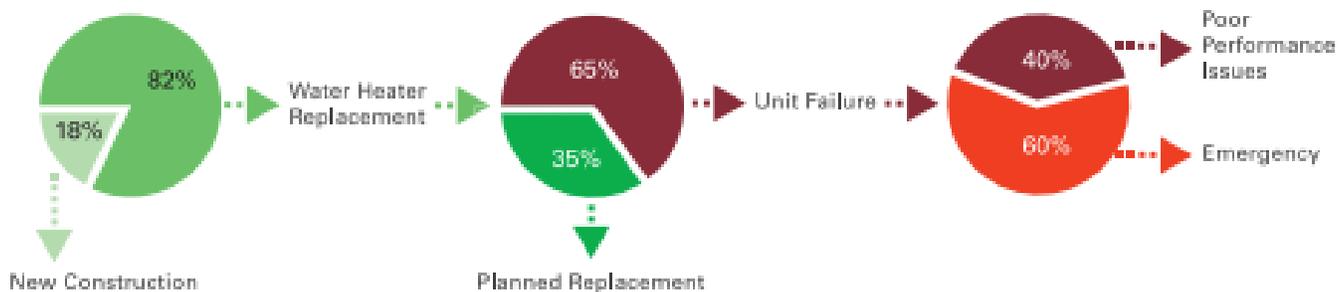
Sistema	EF
Acumulación eléctrico	0,9
Acumulación a gas	0,58
Instantáneo a gas	0,82 – 0,98

#### 4.6. Decisión de compra

A pesar de que no existe una respuesta definida, los datos del mercado y experiencia sugieren que lo que influye en la decisión son, las necesidades de los consumidores, la recomendación de los expertos, la información disponible en el punto de venta y los precios. Los factores críticos en la compra de un calentador de agua de reemplazo son la velocidad para obtener el equipo sin esperas y el precio [25].

Como se puede ver en la Figura 19 el 82% de las ventas son debido a reemplazos de los equipos y dentro de estos el 65% se debe que la unidad ha fallado. El 60% son reemplazos de emergencia debido a la falla completa o parcial de la unidad existente y por lo tanto pocos consumidores tienen el tiempo o el interés de analizar las opciones disponibles. Esto hace que la decisión se vea fuertemente influenciada por lo que el sanitario o el vendedor ofrecen [24].

**ALL WATER HEATER SALES**



Note: The market share shown for new construction is a historical average. New homes accounted for only 11 percent of water heater sales in 2009.

Figura 19. Motivadores de las compras de calentadores de agua en USA [24].

Se destaca que los programas que han experimentado éxito temprano es cuando se crea una asociación con los distribuidores, sanitarios, revendedores y productores. Los vendedores y sanitarios tienen una influencia directa sobre los consumidores mientras que los distribuidores determinan que productos están disponibles y son una buena forma de llegar a los anteriores. Los sanitarios son una buena fuente de asociación ya que influyen de forma directa alrededor del 60% de las compras. Si bien en teoría son ideales en la práctica conseguir alta participación por parte de ellos puede ser difícil ya que el reemplazo de unidades de calentamiento de agua típicamente representa alrededor del 10 a 20% de su negocio y muchos de ellos trabajan por su cuenta [24].



## 5. ENERGÉTICOS

### 5.1. Energía eléctrica

Como se puede ver en la Tabla 13 el sector residencial consume alrededor del 40% de la energía eléctrica que UTE vende en el mercado interno Uruguayo. La participación de este sector ha ido en aumento levemente y en el 2016 representaba el 42% del consumo. Se puede observar que la tarifa que más energía factura es la Residencial Simple [38].

Tabla 13. Distribución del consumo residencial y su participación en el consumo total del país (Elaboración propia en base a los datos obtenidos de [38]).

<b>Energía Eléctrica (GWh)</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>
<b>Tarifa Residencial</b>	2,647	2,723	2,772	2,817	2,834	2,865	2,959
<b>Tarifa Básico Residencial</b>	163	208	228	241	240	266	314
<b>Tarifa Doble Horario Residencial</b>	281	327	358	382	382	409	477
<b>Total Residencial</b>	3,091	3,258	3,358	3,440	3,456	3,540	3,750
<b>Total al mercado interno</b>	7,653	8,017	8,224	8,419	8,427	8,513	8,898
<b>% Residencial</b>	40%	41%	41%	41%	41%	42%	42%

Del Reporte UTE en cifras 2016 que publica UTE con información anual sobre distintos parámetros se puede obtener para el sector residencial cuales son los porcentajes de las distintas tarifas contratadas y cuál es el consumo de cada uno de los sectores [38].

Tabla 14. Distribución de los servicios activos residenciales (Elaboración propia en base a los datos obtenidos de [38]).

	<b>2014</b>		<b>2015</b>		<b>2016</b>	
	<b>Servicios activos</b>	<b>% del total</b>	<b>Servicios activos</b>	<b>% del total</b>	<b>Servicios activos</b>	<b>% del total</b>
<b>Residencial Simple</b>	1,033,636	82%	1,023,269	80%	992,474	76%
<b>Doble Horario Residencial</b>	52,260	4%	58,790	5%	65,818	5%
<b>Básico Residencial</b>	176,155	14%	199,445	16%	242,995	19%
<b>Total</b>	1,262,051		1,281,504		1,301,287	

Tabla 15. Distribución de la Energía Eléctrica vendida en el año (Elaboración propia en base a los datos obtenidos de [38]).

	<b>2014</b>		<b>2015</b>		<b>2016</b>	
	<b>EE vendida(GWh)</b>	<b>% del total</b>	<b>EE vendida(GWh)</b>	<b>% del total</b>	<b>EE vendida(GWh)</b>	<b>% del total</b>
<b>Tarifa Residencial</b>	2,834	82%	2,865	81%	2,959	79%
<b>Tarifa Doble Horario</b>	382	11%	409	12%	477	13%
<b>Tarifa Básico Residencial</b>	240	7%	266	8%	314	8%
<b>Total Residencial</b>	3,456		3,540		3,750	

De la Tabla 14 y Tabla 15 se puede observar que la cantidad total de servicios residenciales activos ha aumentado 1,5% cada año y el consumo lo ha hecho en un 4% anual entre el 2010 y el 2016. La tarifa residencial simple ha ido disminuyendo la participación en el total de los servicios y en la cantidad de energía vendida pero aún sigue siendo la principal tarifa con más de tres cuartos de los servicios activos y las ventas. Esta tarifa ha perdido lugar principalmente con la tarifa básica residencial que ha logrado llegar a casi el 20% de los servicios activos mientras que la doble horario ha aumentado pero levemente ya que se mantiene en el entorno del 5%. En cambio cuando se mira la energía vendida se puede ver que tanto la tarifa doble horario como la básica han aumentado levemente su participación.

#### 5.1.1. Tarifas de energía eléctrica

Como ya se comentó previamente, la factibilidad de cada sistema de calentamiento de agua va a depender de la performance energética del sistema bajo las condiciones climáticas y los patrones de consumo de agua caliente. Pero además se debe considerar que la performance en equipos que consumen energía eléctrica también se va a ver influenciada por la tarifa eléctrica seleccionada. Por ejemplo, si se elige una tarifa donde la oferta de energía sea fuera del periodo de punta, esta tarifa seleccionada puede no ajustarse a los patrones de demanda de ciertos hogares. Por lo tanto se debe evaluar el efecto de distintas tarifas de energía eléctrica en la performance de los sistemas de manera de determinar la estrategia óptima. Se debe buscar en tarifas con diferentes franjas horarias la reducción de la energía total demandada pero también que la demanda en el pico sea la menor posible siempre buscando que el nivel de servicio del abastecimiento de agua caliente no se vea limitado [30].

Tarifas residenciales disponibles actualmente vigentes desde el 01/01/2018 [31]:

#### **Tarifa Residencial Simple**

Aplica para los servicios con modalidad de consumo residencial cuya potencia contratada sea menor o igual a 40 kW.

Cargo por consumo de energía:

- 1 kWh a 100 kWh mensuales \$ / kWh 4,881
- 101 kWh a 600 kWh mensuales \$ / kWh 6,121
- 601 kWh en adelante \$ / kWh 7,63

Cargo por potencia contratada \$ / kW 58,3

Cargo fijo mensual \$ 188,2

### **Tarifa Doble Horario Residencial**

Aplica para los servicios con modalidad de consumo residencial cuya potencia contratada sea mayor o igual a 3,3 kW y menor o igual a 40 kW, con carácter opcional.

Cargo por consumo de energía:

- Punta 8,157 \$ / kWh
- Fuera de punta 3,267 \$ / kWh

Cargo por potencia contratada \$ / kW 58,3

Cargo fijo mensual \$ 340

Los cargos por energía se distribuyen en dos períodos horarios, durante todos los días que integran la factura mensual, de acuerdo al siguiente detalle.

Durante el período en que rige la Hora Oficial habitual:

- Horas Punta: de 17:00 a 23:00 hrs.
- Horas Fuera de Punta: de 00:00 a 17:00 y de 23:00 a 24:00 hrs.

Durante el período en que rige el adelanto de la Hora Oficial:

- Horas Punta: de 18:00 a 24:00 hrs.
- Horas Fuera de Punta: de 00:00 a 18:00 hrs.

### **Tarifa de Consumo Básico Residencial**

Aplica para servicios monofásicos con modalidad de consumo residencial, a titulares de único suministro, cuya potencia contratada sea igual o menor a 3,7 kW, con carácter opcional.

A los efectos de permanecer en esta tarifa no se podrá superar más de dos veces los 230 kWh/mes, en los últimos doce meses (año móvil), pasando automáticamente a la Tarifa Residencial Simple al tercer mes que se supere el consumo mencionado.

El cargo mensual, con derecho a un consumo de hasta 100 kWh / mes es de \$ 305,3.

Luego el cargo por consumo de energía se divide de la siguiente manera:

- 101 kWh a 140 kWh mensuales \$ / kWh 6,287
- 141 kWh a 350 kWh mensuales \$ / kWh 11,495
- 351 kWh en adelante \$ / kWh 7,63

## 5.2. Gas Natural y Gas licuado de petróleo

El gas licuado de petróleo (GLP) es un subproducto del petróleo y está compuesto por una mezcla de butano y propano, aproximadamente en volumen de 50% a 80% de butano y 20% a 50% de propano. Lo común es que se encuentre en una relación 70% a 30% aproximadamente. Es un gas más pesado que el aire, pesando casi el doble que el aire. La mezcla no tiene olor por lo cual en la refinería se le agregan Mercaptanes, que le dan el olor característico que permite detectar posibles escapes o fugas. A presión y temperatura ambiente, la mezcla se encuentra en estado gaseoso, pero al ser sometida a mayor presión pasa a estado líquido permitiendo su envasado en garrafas, cilindros, tanques y esferas [39]. El poder calorífico del GLP está entre 11800 y 11850 kcal/kg (13.71 - 13.77 kWh/kg) [39, 40].

En Uruguay el GLP es producido o importado únicamente por ANCAP y comercializado por Riogas, Acodike y Megal y DUCSA.

El gas natural es un producto incoloro e inodoro, no tóxico y más ligero que el aire que proviene de la descomposición de los sedimentos de materia orgánica atrapada entre estratos rocosos. La mezcla de hidrocarburos livianos se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente y presión atmosférica. Como se puede apreciar en la Tabla 16, el gas natural está compuesto por gases, siendo el metano el componente mayoritario ya que se encuentra en más de un 90% [41, 42].

Tabla 16. Composición típica del Gas Natural [41].

Metano	92 %
Etano	4,2 %
Propano	0,6 %
Butano	0,1 %
Nitrógeno	1,0 %
Anhídrido carbónico	2,1 %

Aunque los gases que lo componen tienen distintos poderes caloríficos, se considera normalmente un poder calorífico de 9300 kcal/m<sup>3</sup> (10,81 kWh/m<sup>3</sup>) [41, 42].

El gas natural que se utiliza en Uruguay es importado y en Montevideo es comercializado por Montevideo Gas mientras que en el interior Conecta lo comercializa para los departamentos de Paysandú, Colonia, San José y Canelones.

Como se puede ver en la Tabla 17 el consumo de Gas Natural ha aumentado en los últimos años mientras que el del GLP se ha mantenido relativamente constante logrando su máximo en 2016. Se puede apreciar que el porcentaje de gas natural que consume el sector residencial ha ido en aumento y hoy en día es más de la mitad del total consumido en el país, mientras que para el GLP la participación en el consumo del sector residencial ha disminuido y se encuentra en torno al 80%. El total del gas natural es importado mientras que parte del GLP proviene de la refinería de ANCAP y otra parte de la importación a otros países como Argentina y Brasil principalmente. El porcentaje de importación ha ido disminuyendo y hoy en día se encuentra en el entorno del 30%.

Tabla 17. Consumo a nivel país y participación en el sector residencial de Gas Natural y GLP (Elaboración propia en base a [20, 37]).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Gas Natural (GWh)</b>	200	240	244	263	236	247	291
<b>Consumo Sector Residencial</b>	38%	41%	45%	48%	47%	49%	52%
<b>GLP (GWh)</b>	1.229	1.228	1.213	1.287	1.190	1.182	1.334
<b>Consumo Sector Residencial</b>	85%	82%	78%	76%	75%	78%	78%
<b>GLP Importado (%)</b>	44%	53%	39%	33%	35%	33%	29%

### 5.2.1. Tarifas de gas

La tarifa aplicable a Enero de 2018 de Montevideo Gas tiene un costo fijo de 337,39 \$ y un cargo variable de 29,98 \$/m<sup>3</sup> (2,8 \$/kWh) consumido [43]. Mientras que en Paysandú la tarifa de Conecta tiene un costo fijo de 180,512 \$ y un cargo variable de 21,893 \$/m<sup>3</sup> (2,0 \$/kWh). Para Colonia, San José y Canelones la tarifa de Conecta tiene un costo fijo de 180,512 \$ y un cargo variable de 22,183 \$/m<sup>3</sup> (2,1 \$/kWh) [44].

El precio del GLP a Enero de 2018 en el territorio uruguayo es de 43,5 \$/kg (3.2 \$/kWh) [73].

### 5.3. Incentivos y Normativas Internacionales

Energy Star es un estándar internacional para productos eficientes desde el punto de vista energético originado en Estados Unidos. Se creó en el año 1992 por la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía. Desde ese entonces Australia, Canadá, Japón, Nueva Zelanda, Taiwán y la Unión Europea han adoptado el programa. Los dispositivos que llevan la certificación comúnmente utilizan 20 a 30 % menos energía que los estándares requeridos por las leyes federales de USA.

Las razones por la cuales Energy Star está involucrado en los calentadores de agua son [16]:

- Poca participación en el mercado de los sistemas certificados que pueden lograr ahorros significativos para los consumidores durante su vida útil.
- El 37% de los sistemas instalados en USA ya llevan instalados 10 años o más.
- La oportunidad de cambiar las decisiones de la gente a través de la educación y conciencia sobre los beneficios de reemplazar los sistemas.
- Disponibilidad de los incentivos y créditos fiscales disponibles en programas de eficiencia energética.

Se ha reportado que los consumidores en USA están informados acerca del programa Energy Star ya que dos tercios de los hogares pueden reconocer la etiqueta Energy Star y más de tres cuartos de las casas tienen al menos un entendimiento general del objetivo de la etiqueta. En USA cualquier equipo que se compre calificado como Energy Star puede aplicar para un crédito impositivo, lo que incentiva a los consumidores a buscar productos eficientes energéticamente con la etiqueta [28].

En la Tabla 18 puede observarse los requisitos que deben cumplir los equipos para ser etiquetados como Energy Star mientras que en la Tabla 19 se pueden observar los requisitos pedidos por los estándares federales de USA.

Tabla 18. Criterios Energy Star para calentadores de agua [25].

Type	Minimum Energy Factor	Minimum First-Hour Rating** (gallons/hour)	Minimum Warranty	Safety
High-Efficiency Gas Storage	0.67	67	6 years on sealed system	Compliance with ANSI <sup>†</sup> Z21.10.1/CSA 4.1
Whole-Home Gas Tankless	0.82	2.5 gallons per minute at a 77°F rise***	10 years on heat exchanger and 5 years on parts	Compliance with ANSI <sup>†</sup> Z21.10.1/CSA 4.1 or ANSI Z21.10.3/CSA 4.3, depending on burner size
Gas Condensing	0.8	67	8 years on sealed system	Compliance with ANSI <sup>†</sup> Z21.10.1/CSA 4.1
Heat Pump	2.0	50	6 years on sealed system	Compliance with UL <sup>††</sup> 174 and UL 1995
Solar	0.50 Solar Fraction*	–	10 years on solar collector, 6 years on storage tank, 2 years on controls, and 1 year on piping and parts	OG-300 certification from SRCC <sup>†††</sup>

Notes:

\* Based on the Solar Rating and Certification Corporation's (SRCC) conversion formula: Solar Fraction = 1 – (Energy Factor/ Solar Energy Factor), assuming a 0.6 or 0.9 energy factor for gas or electric backup, respectively.

\*\* The first-hour rating is the amount of hot water in gallons the heater can supply in the first hour starting with a tank full of hot water.

\*\*\* Hot water delivery from tankless water heaters is not measured by first-hour rating, but rather by the maximum flow rate that the heater can achieve while maintaining a particular temperature rise.

<sup>†</sup> The American National Standards Institute (ANSI) assists other organizations in developing safety standards for many different appliances, including gas water heaters. The Z21.10.1/CSA 4.1 standard applies to water heaters that burn at 75,000 Btu per hour or less and sets guidelines for safe operation. Gas water heaters with burners that operate at more than 75,000 Btu per hour must comply with the Z21.10.3/CSA 4.3 standard.

<sup>††</sup> Electric water heaters, such as heat pump water heaters, are tested under Underwriters Laboratories (UL) 174. This standard is a set of guidelines for proper functioning and design of electric water heaters.

<sup>†††</sup> SRCC's OG-300 standard outlines minimum quality and operational requirements for solar water heaters.

Tabla 19. Estándares federales para calentadores de agua efectivos a partir de abril de 2015 para USA [24].

Type	Volume ≤ 55 Gallons	Volume > 55 Gallons
Gas Storage	$EF = 0.675 - (0.0015 \times \text{Volume})$	$EF = 0.8012 - (0.00078 \times \text{Volume})$
Electric Storage	$EF = 0.960 - (0.0003 \times \text{Volume})$	$EF = 2.057 - (0.00113 \times \text{Volume})$
Gas Tankless	$EF = 0.82 - (0.0019 \times \text{Volume})$	

Note: Gas tankless water heaters may store up to two gallons of water. In these cases, the minimum required energy factor is slightly lower than 0.82.

En las Figura 20 a Figura 22 vemos los requisitos federales que deben tener en USA los distintos equipos y estos se comparan con los requisitos federales anteriores y los Energy Star. Se puede apreciar cómo han ido siendo cada vez más exigentes a lo largo del tiempo para dirigir el mercado hacia equipos más eficientes.

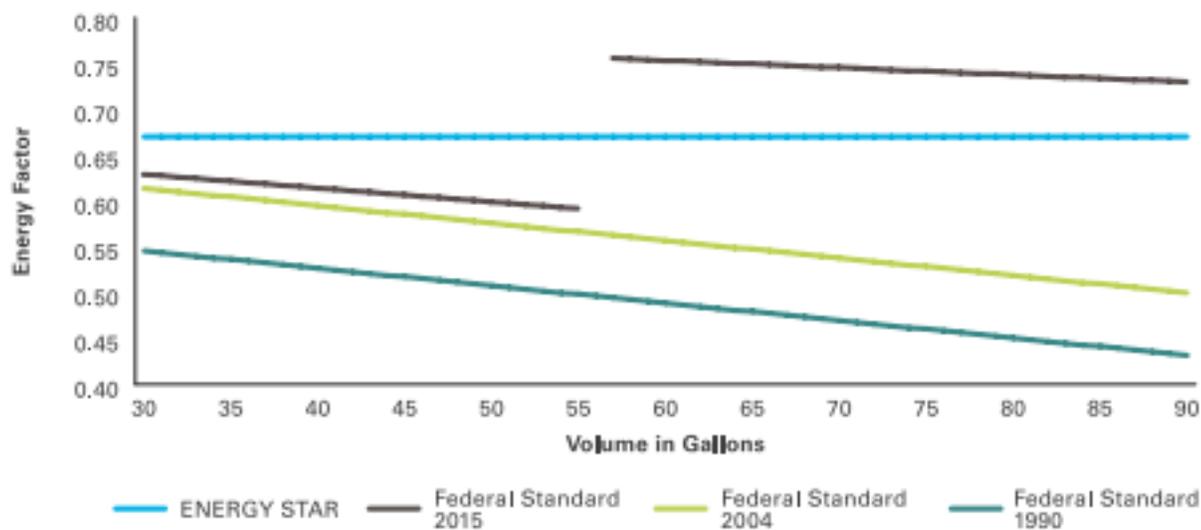


Figura 20. Requisitos de eficiencia para calentadores de agua con almacenamiento a gas [24].

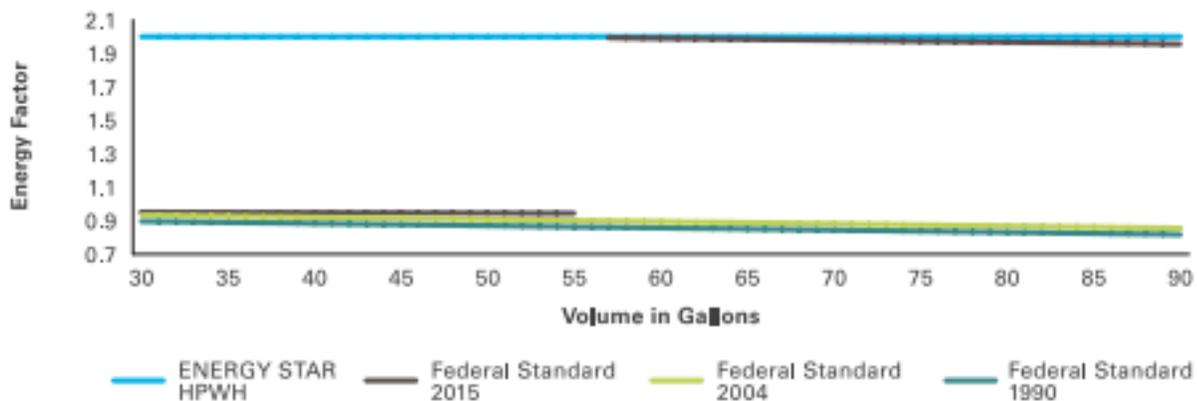


Figura 21. Requisitos de eficiencia para calentadores de agua con almacenamiento eléctricos [24].

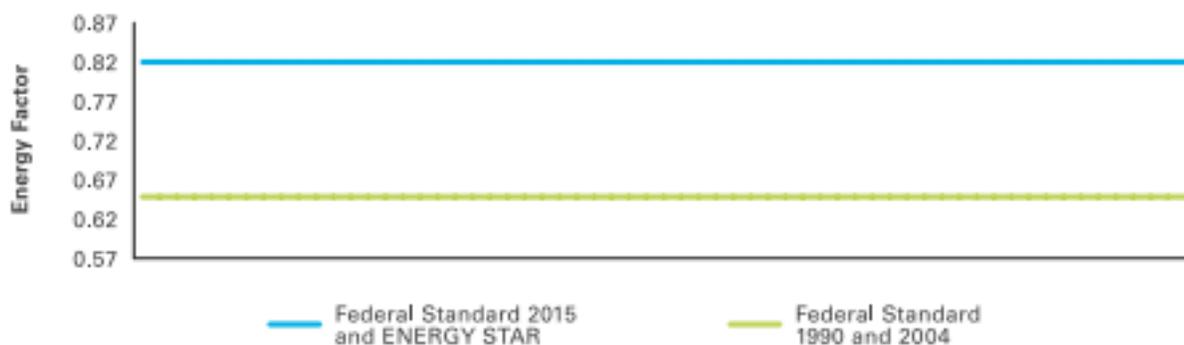


Figura 22. Requisitos de eficiencia para calentadores de agua sin almacenamiento a gas [24].

Los incentivos y medidas de regulación sobre las distintas tecnologías varían en los distintos países. En Estados Unidos se está promoviendo el uso de sistemas a gas sin almacenamiento y existen medidas muy estrictas sobre sistemas eléctricos y en especial en los de almacenamiento. Estas medidas sobre mínima performance aceptada son seguidas por Canadá, Australia y Nueva Zelanda. En China y Europa se promueven los CSA mientras que en Japón se promueven las bombas de calor y los sistemas de gas con condensación con un mínimo de 83% de eficiencia calorífica. Los límites en emisiones de NOx y CO aún continúan siendo raros a nivel mundial [5].

Estas iniciativas para dirigirse hacia equipos más eficientes no son tan efectivas debido a las barreras existentes como [5, 28]:

- *altos costos de capital* – Reducen la accesibilidad económica ya que los consumidores necesitan una gran inversión inicial para luego ver los ahorros. En muchos casos un equipo eficiente puede costar varias veces más que uno menos eficiente y por más de que los ahorros van a ser mayores al costo inicial este hecho no es suficiente incentivo. Esto se cumple particularmente si el equipo se instala para alguien distinto al propietario ya que no verá un beneficio en el ahorro energético que otorga el equipo más eficiente si los energéticos no se incluyen en el alquiler.
- *la aceptación por parte del mercado* – Para lograr una gran aceptación en el mercado los sistemas deben lograr una performance sostenida y superior para ganarse la aceptación tanto de consumidores como de instaladores. Y además muchos necesitan más espacio para su instalación y esto puede desalentar a los consumidores.
- *limitaciones asociadas a reemplazos de emergencia* – Los reemplazos de emergencia requieren una disponibilidad inmediata por lo que rara vez las alternativas más eficientes son consideradas debido a que no es común que se haga una búsqueda intensiva por un equipo más eficiente y se instala lo que haya disponible.
- *incentivos divididos* – Los compradores no son siempre los usuarios finales pudiendo priorizar el costo inicial menor a los ahorros energéticos en el largo plazo. Esto es particularmente importante en construcciones nuevas donde el constructor puede optar por el sistema más económico permitido. Además, muchas veces las decisiones son tomadas por los instaladores ya que los consumidores se perciben con conocimientos insuficientes y donde los motivos del instalador y su entrenamiento pueden tener una influencia muy significativa.
- *la disponibilidad de ciertos energéticos* – Limitaciones en el acceso a gas por cañería o la estructura de la casa si no dispone de chimeneas pueden implicar que los sistemas a gas muchas veces no sean considerados. Para sistemas solares la ausencia de un techo apropiado o el clima pueden llevarlos también a no ser considerados.

#### 5.4. Incentivos y Normativas en Uruguay

En el marco normativo del sector Eficiencia Energética se destacan las siguientes normas:

- Ley Nº 18.585, que declara de interés nacional la investigación, el desarrollo y la formación en el uso de la energía solar térmica
- Ley Nº 18.597, de uso eficiente de la energía en el territorio nacional
- Decreto Nº 429/009, de Sistema Nacional de Etiquetado de Eficiencia Energética
- Decreto Nº 116/011, que determina la fiscalización de los productos comprendidos en el Sistema Nacional de Etiquetado de Eficiencia Energética
- Decreto Nº 451/011, que fija medidas que permitan diversificar la matriz energética, incorporando energías renovables como la solar térmica
- Resolución del MIEM Nº 72/014, que aprueba las condiciones técnicas mínimas de calidad, seguridad y eficiencia que deben cumplir las instalaciones solares térmicas para calentamiento de agua.
- Decreto Nº 202/014, que realiza recomendaciones a la URSEA en materia de energía solar térmica.
- Decreto Nº 211/015, que aprueba el Plan Nacional de Eficiencia Energética

Donde el MIEM creó, en el ámbito de la Dirección Nacional de Energía, la Unidad de Eficiencia Energética. Luego, la Ley Nº 18.585 y su decreto reglamentario Decreto No. 451/011 que declara de interés nacional el uso de la energía solar térmica. El decreto No. 211/015 con el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015 – 2024 (elaborado por el MIEM) tiene como objetivo alcanzar una meta de Energía Evitada de 1.690 kTep (19,65 TWh) para el período. Para lograr esto se buscará tener instalados al final de período más de 150.000 m<sup>2</sup> de colectores solares térmicos, más de la mitad de ellos en el Sector Residencial, esto representa unas 50.000 instalaciones familiares. Como se puede ver en la Figura 23 en este sector se proyecta que todos los consumos van a disminuir en el período, especialmente los consumos eléctricos donde el calentamiento de agua sanitaria juega un papel importante [23].

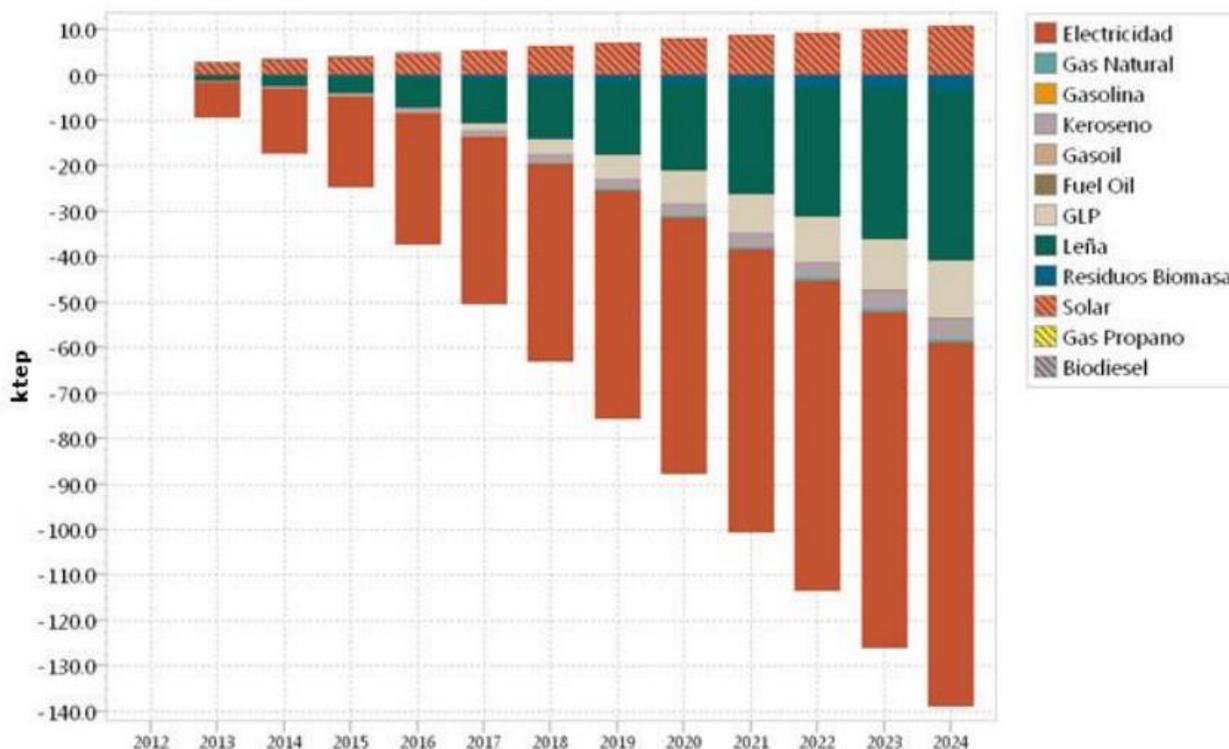


Figura 23. Variación de consumo del Sector Residencial, por fuente de energía, en el Escenario de Eficiencia Energética de acuerdo al Plan Nacional de Eficiencia Energética [23].

Para los calentadores de agua eléctricos de acumulación de uso doméstico en Uruguay existe la norma UNIT 1157:2010 que establece la metodología para la clasificación de acuerdo con su desempeño energético, los métodos de ensayo y las características de la etiqueta de eficiencia energética [22]. También, se encuentra la Resolución MIEM N° 72/014- que regula las condiciones técnicas mínimas de calidad, seguridad y eficiencia que deben cumplir las instalaciones solares térmicas para calentamiento de agua [23].

Para reducir el consumo de energía en calentadores de agua el MIEM recomienda [11]:

- Regular la temperatura máxima entre 50 y 60°C.
- Limitar el tiempo de baño al estrictamente necesario, baños demasiado prolongados representan un desperdicio de agua y energía.
- Coordinar entre los integrantes del hogar los horarios para baños de forma de evitar utilizar el termotanque en horas de la noche entre 18 a 23 hs.
- Minimizar el uso de agua caliente proveniente de termotanques eléctricos para el lavado de vajilla y cualquier otro uso en la cocina.

También existen recomendaciones del MIEM para comprar un termotanque [11]:

- Al elegir un termotanque se debe verificar la calidad del aislamiento térmico, teniendo en cuenta que incide la calidad del material y su espesor.
- Evitar comprar termotanques usados ya que los avances tecnológicos en aislamiento térmico juegan a favor del ahorro de energía.
- Si el termotanque tiene más de 15 años es posible que la calidad del aislamiento térmico no sea la adecuada, por lo que se debe cambiar el equipamiento por uno nuevo.
- Elegir el equipo adecuado para el uso que piensa darle, evitando sobredimensionar el equipamiento.
- Evitar instalar el termotanque eléctrico al aire libre, buscando hacerlo en gabinetes aislados y no expuestos a flujos de aire.
- Se debe instalar los termotanques a gas en gabinetes aislados térmicamente y con la ventilación de acuerdo a las normas de seguridad.
- Disminuir la extensión de la instalación de agua caliente, evitando que los caños de agua caliente sin aislamiento térmico estén en contacto directo con el ambiente.

**Luego UTE presenta los siguientes planes relacionados al calentamiento de agua:**

#### Plan Recambio de Termotanques

Tiene como objetivo fomentar la eficiencia energética, a través del uso de termotanques Clase A, de 60 litros, o más.

De acuerdo a UTE, los beneficios que este cambio representa son los siguientes [45]:

- Bonificación: UTE te regala \$1.000, descontables en tu próxima factura.
- Mayor eficiencia: los termotanques con etiquetado Clase A son los mejores del mercado, aseguran una mayor eficiencia y un menor consumo eléctrico.
- Mayor acumulación: más confort para toda tu familia, ya que disponés de mayor cantidad de agua caliente en cualquier momento del día.
- Bonificación extra: si contratás el Plan Inteligente, obtenés una bonificación de \$500 extra (IVA incluido) en la factura.

### Plan Termotanques Inteligentes

Es un plan piloto que tiene como objetivo definir diferentes estrategias para actuar sobre los termotanques de los clientes de forma de reducir el gasto de energía asociado al calentamiento de agua, y UTE se beneficia al maximizar la eficiencia en la utilización de la red eléctrica y optimizando la generación de energía. Esto se lleva a cabo mediante un dispositivo que permite habilitar el encendido y apagado del termotanque en forma remota por parte de UTE, a través de la red de Antel. La inteligencia de este equipo se traduce en garantizar la disponibilidad de agua caliente al mínimo costo posible [46].

De acuerdo a UTE, los beneficios son los siguientes [46]:

- Bonificación de \$244 en la factura de UTE durante 12 meses.
- Disminución del consumo de energía asociado al calentamiento de agua. Hay que tener en cuenta que el calentamiento de agua representa, en promedio, el 37% del consumo de energía del hogar.
- Asesoramiento personalizado, consistente en recomendaciones de ahorro y tarifa adecuada al nivel de consumo.
- Instalación gratuita del timer remoto.

### Plan solar

Es un plan orientado por acciones de la DNE, UTE, BSE, BHU y la URSEA, con el fin de incentivar el uso de Energía Solar Térmica en el sector residencial. Este plan, permite tener un mayor confort y al mismo tiempo lograr un ahorro real en el consumo de la electricidad, entre un 15% y un 20% [47].

Los beneficios reportados son los siguientes [47]:

- A los primeros 2.000 clientes, se les descontarán \$700 + IVA por mes en la factura de UTE, durante 2 años.
- Ahorro real en el consumo de electricidad, entre un 15% y 20%.
- Garantía por 5 años en el equipo y la instalación.
- Seguro total (hurto, vandalismo, daños a terceros y clima), durante 5 años.
- Acceso a los mejores calentadores solares de agua del mercado, aprobados por la DNE y la URSEA.

De lo incentivos y normativas anteriores se puede concluir que el país apoya y subsidia los equipos eléctricos con almacenamiento (calefones) y los CSA. Estos últimos no han tenido mucho éxito ya que aún no se ha llegado a los 2000 equipos y el plan está presente desde el 2012. Se puede deber a la desconfianza de los usuarios y también a la inversión que deben hacer inicialmente. Muchas veces la gente no presta atención al método de calentamiento de agua porque tradicionalmente siempre se ha usado un calefón. Esto influye en que el plan y la respuesta que da la gente no se encuentran alineados y si se quiere lograr mejoras se deberá replantear el plan para poder hacerlo más atractivo a los consumidores. Por último, se debe destacar que los equipos a gas para calentamiento de agua y las

bombas de calor no son promocionados ni reciben ningún tipo de apoyo. Por lo cual la política no se encuentra centrada en promover los equipos más eficientes.

## 6. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

### 6.1. Usos de agua caliente y generación de sus eventos

Se plantea utilizar como base para determinar algunos de los parámetros necesarios para crear el perfil de consumo la planilla de eventos DWH (Domestic Water Heating) Event Schedule Generator que proporciona el Departamento de Energía de USA [72]. Se utilizará los perfiles de consumo para los usos en ducha, pileta y lavado de platos ya que son los más representativos en Uruguay. Los casos de lavarropas con entrada de agua caliente y baños de inmersión son menos comunes en Uruguay por lo cual no se van a tener en cuenta.

Como fue comentado anteriormente en relación a la complejidad que existe para calcular el consumo de agua por persona y por hogar, es que se utilizan funciones de probabilidad para determinar:

- La hora del día en la cual ocurre un evento de consumo (ducha, canilla o lavado de platos)
- La duración del evento
- El flujo del evento

Las distribuciones de probabilidad de ocurrencia a lo largo del día para los 3 usos descriptos a lo largo de las horas del día se obtuvieron de trabajos del National Renewable Energy Laboratory (NREL) y se puede apreciar en la Figura 24 la distribución de probabilidad a lo largo del día para cada uno de los usos [3, 29, 52].

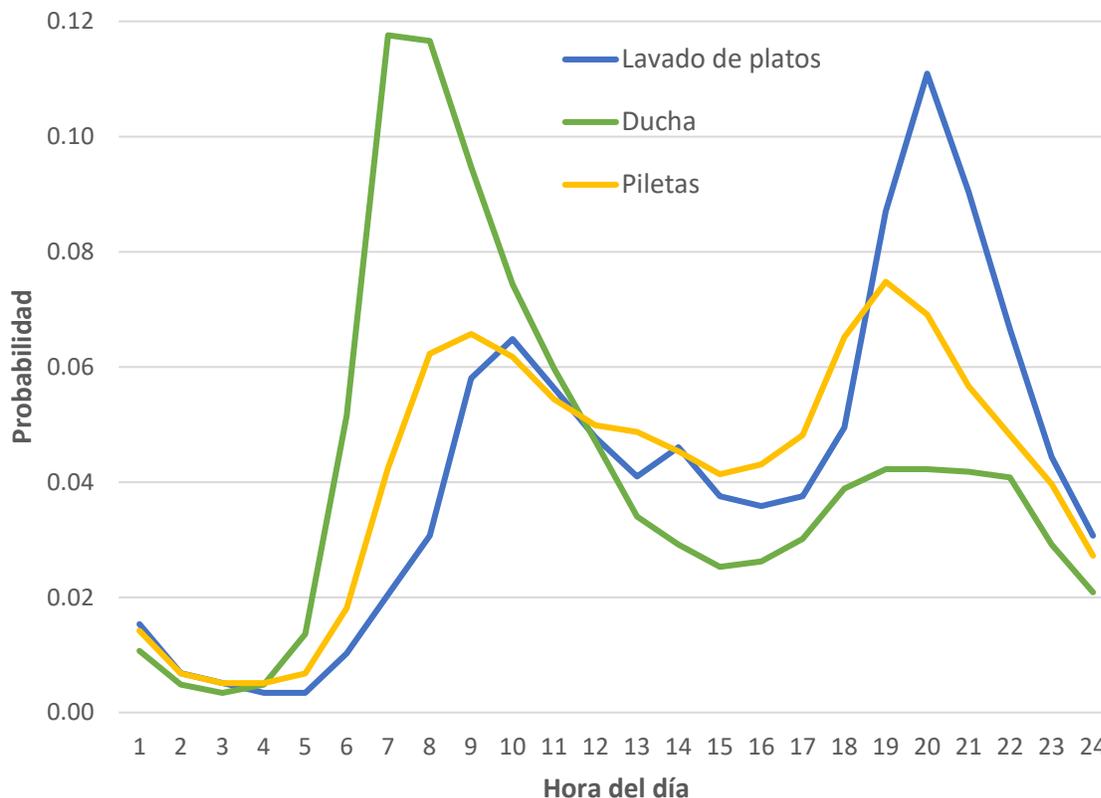


Figura 24. Distribuciones de probabilidad de ocurrencia a lo largo del día para ducha, canilla y lavado de platos (Elaboración propia en base a los datos de [3, 29, 52]).

Dentro de la población normalmente se encuentran 2 comportamientos típicos a la hora de ducharse, de mañana o de noche. Normalmente la ducha de noche es más común en personas que trabajan en trabajos que requieren esfuerzos físicos, como por ejemplo trabajadores rurales o de la construcción pero normalmente las personas se bañan a la mañana lo que se puede apreciar en la Figura anterior.

De acuerdo a los estudios realizados por NREL la distribución de probabilidad de la duración de las duchas y del lavado de platos son Log-Normal y para las piletas la distribución es exponencial mientras que el flujo de todos los usos presenta una distribución normal. Las distribuciones son representadas por las siguientes ecuaciones [52]:

$$Y_{lognorm} = e^{\frac{\ln(\frac{\mu^2}{\sigma^2 + \mu^2}) + \sqrt{\ln\left[\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1}\right] \times \sqrt{-2 \ln X_1} \times \sin(2\pi X_2)}{2}}$$

Where: Y = random variable with a log-normal distribution  
 $X_1$  and  $X_2$  are two uniform random numbers between 0 and 1  
 $\mu$  = mean of lognormal distribution  
 $\sigma$  = standard deviation of lognormal distribution

$$Y_{norm} = \mu + \sigma \sin(2\pi X_1) \sqrt{-2 \ln(X_2)}$$

Where: Y = random variable with a normal distribution  
 $\mu$  = mean of normal distribution  
 $\sigma$  = standard deviation of normal distribution

$$Y_{exp} = \mu \ln(X)$$

Where: Y = random variable with an exponential distribution  
X = a uniform random number between 0 and 1  
 $\mu$  = mean of exponential distribution

Debido a la falta de información para Uruguay se utilizaron 11 datos experimentales de caudal y tiempo para una ducha de trabajos de final de curso. Estos valores se utilizaron para obtener el promedio y desviación estándar del flujo y de la duración de una ducha en Uruguay [74, 75]:

Caudal (litros / minuto):

- Promedio → 8,14
- Desv. Estandar → 1,76

Duración (minutos):

- Promedio → 5,68
- Desv. Estandar → 1,69

Suponiendo que una persona se baña una vez por día se supondrá un evento de ducha por día por persona. Con números aleatorios y las distribuciones anteriores se obtienen el valor de duración, de flujo y la hora del día a la que ocurre dicho evento.

Se limitó la duración de las duchas para que no puedan ser menores que 2 minutos ni mayores de 15 minutos. Ducha menores a 2 minutos son muy poco comunes y no representativas. Luego, tomando el flujo promedio (8,14 litros por minuto) y 15 minutos de duración se obtiene una ducha de 122 litros

lo cual no sería representativa para las duchas de Uruguay debido a que predominan los calefones y generalmente no mayores a 60 litros. Por último, para asegurarse esta última condición también se limitó el volumen máximo de un evento de ducha en 120 litros para evitar que se generen eventos no representativos.

Como no se dispone de datos para Uruguay de consumo diario para piletas y lavado de platos se utiliza un porcentaje del consumo de ducha. Se utilizarán los datos de otros países para obtener los porcentajes de las duchas representan las piletas y el lavado de platos y así determinar la cantidad de eventos por persona por día. Luego para la duración y flujo se utilizan los valores reportados por el NREL:

#### **Piletas:**

Caudal (litros / minuto):

- Promedio → 4,32
- Desv. Estandar → 2,31

Duración (minutos):

- Promedio → 0,62
- Desv. Estandar → 0,67

#### **Lavado de platos:**

Caudal (litros / minuto):

- Promedio → 5,26
- Desv. Estandar → 0,76

Duración (minutos):

- Promedio → 1,38
- Desv. Estandar → 0,37

Fuente: [3, 29, 52]

El NREL reporta para 3 personas los siguientes consumos y sus porcentajes relativos al consumo en duchas (Tabla 20):

*Tabla 20. Consumos diarios de acuerdo al NREL para un hogar con 3 personas (Elaboración propia en base a los datos de [3, 29, 52]).*

	Consumo litros / día	% respecto a ducha
<b>Duchas</b>	106	-
<b>Pileta</b>	95	90%
<b>Lavado de platos</b>	19	18%

Se utilizó para el consumo de agua para el lavado de platos el 18% del valor obtenido para Uruguay de duchas pero para el consumo en piletas el 90% de lo consumido en duchas parece demasiado por lo cual se plantea utilizar un 28% de lo consumido en duchas ya que de acuerdo un estudio realizado en el Reino Unido donde se consideraron 112 casas, las piletas del baño consumían un 28% de lo que consumían en duchas [66].

Para obtener la cantidad de eventos diarios por persona por día para pileta y lavado de platos se multiplica el porcentaje de consumo diario mencionado anteriormente (28% para piletas y 18% para lavado de platos) por la cantidad de agua promedio que se consume en una ducha (promedio de la distribución de duración por promedio de la distribución del flujo) y se divide por la cantidad de agua promedio que se consume para pileta y lavado de platos.

$$\text{Cantidad de eventos pileta} = \frac{0,28 \mu_{\text{duración, ducha}} \mu_{\text{flujo, ducha}}}{\mu_{\text{duración, pileta}} \mu_{\text{flujo, pileta}}}$$

$$\text{Cantidad de eventos lavado de platos} = \frac{0,28 \mu_{\text{duración, ducha}} \mu_{\text{flujo, ducha}}}{\mu_{\text{duración, lavado}} \mu_{\text{flujo, lavado}}}$$

Para el lavado de platos y las piletas se limitó a que la duración fuera mayor a 0 y que el flujo se encontrara en el rango de 1 a 11 litros por minuto donde el máximo coincide con el máximo flujo que fue relevado de los pocos datos que se disponían de Uruguay.

En la Tabla 21 se resume la cantidad de eventos por día por persona que se consideran a la hora de generar los eventos.

Tabla 21. Cantidad de eventos por día por persona para los 3 usos considerados (ducha, pileta, lavado de platos).

Uso	Eventos por día por persona
Ducha	1
Pileta	5
Lavado de platos	1

Se utilizó un hogar de 3 personas debido a que de acuerdo al Censo 2011 realizado por el Instituto Nacional de Estadística en Montevideo hay 1,3 millones de personas que residen en hogares particulares y 487 mil hogares particulares dando un promedio de 2,7 personas por hogar [53].

De acuerdo a lo relevado de la bibliografía y comentado en el punto 2.5 Perfiles de consumo de agua caliente residencial, se considera que la estimación es buena debido a que se encuentra en valores que pertenecen a los rangos informados y son muy similares. En la Tabla 22 se puede apreciar una comparativa de los resultados informados por las distintas bibliografías en el punto 2.5 y por último la considerada para la simulación.

Tabla 22. Litros per cápita por día reportados en la bibliografía en comparación con los posibles obtenidos en la simulación [80].

<b>Autores</b>	<b>Litros per cápita por día</b>
Pearlman & Mills	47 - 86
Becker & Stogsdill	Se supone similar al anterior debido a que el total por día y la región son similares.
Swan et al.	67
DeOreo & Mayer	95
Merrigan	54 - 83
Estándar utilizado en Canadá	60
Reino Unido	63 - 75
Vieira et. al.	91
Water Research Foundation USA	79
NREL	73 - 146
<b>Simulación</b>	<b>69</b>

## 6.2. Información climatológica

De la página del Laboratorio de Energía Solar (LES) se obtiene la información de un año meteorológico típico para Montevideo. Los datos relevantes para el cálculo para cada día y mes del año son:

- Temperatura ambiente
- Velocidad del viento
- Irradiación en un plano de 45 grados

Se toma una inclinación de 45 grados debido a que la inclinación óptima para obtener la mayor cantidad de radiación incidente a lo largo del año es similar a la Latitud (35 grados para Montevideo) pero como se busca maximizar la generación en invierno debido a que hay menos horas de sol, más días nublados y lluviosos es que se busca una inclinación mayor a la óptima [56].

En la Tabla 23 se puede encontrar los promedios de Temperatura ambiente y de Irradiación en el plano inclinado de 45 grados para cada mes del año.

Tabla 23. Temperatura ambiente promedio mensual e Irradiación diaria promedio mensual en un plano de 45 grados para Montevideo.

Mes	Temp ambiente Promedio (°C)	Irradiación Promedio (Wh/m <sup>2</sup> día)
1	22,3	5.989
2	21,8	5.895
3	20,9	5.293
4	17,2	5.114
5	14,2	3.542
6	10,7	3.434
7	10,3	3.365
8	11,3	4.298
9	13,9	4.762
10	15,7	5.513
11	19,2	5.284
12	24,5	5.968
Promedio	16,8	4.871

### 6.3. Temperatura del agua de entrada a la vivienda

La temperatura del agua de entrada varía a lo largo del año dependiendo del clima y la localización. En Uruguay no existen datos sobre esta temperatura por lo que se plantea usar una ecuación que proviene de una correlación basada en medidas reales en USA. Los parámetros se determinaron al ajustar los datos disponibles para varias localizaciones de USA, obteniendo la siguiente ecuación:

$$T_{mains} = (T_{amb,avg} + offset) + ratio \left( \frac{\Delta T_{amb,max}}{2} \right) \sin(0,986(day\# - 15 - lag) + 90)$$

Fuente: [3, 29, 52]

Donde:

- $T_{mains}$  → Temperatura de entrada del agua al hogar
- $T_{amb, avg}$  → Promedio anual de la temperatura del aire ambiente
- Offset → 6 °F
- Ratio →  $0,4 + 0,01*(T_{amb, avg} - 44)$
- $\Delta T_{amb, max}$  → Diferencia máxima entre las temperaturas ambiente mensuales
- Day# día juliano del año (1-365)
- Lag →  $35 - (T_{amb, avg} - 44)$

En la Tabla 24 se puede ver los valores de temperatura del agua de entrada mes a mes.

Tabla 24. Valores de temperatura del agua de entrada a lo largo del año.

Mes	Tmains (°C)
1	26,4
2	26,5
3	24,9
4	21,9
5	18,4
6	15,3
7	13,4
8	13,2
9	14,9
10	17,9
11	21,4
12	24,5

#### 6.4. Temperatura de almacenamiento de agua caliente

En cuanto al almacenamiento de agua caliente se ha descrito extensivamente en la literatura que temperaturas mayores a 55 °C inhiben el crecimiento de Legionella sp. Por lo tanto para poder controlar la proliferación en sistemas con almacenamiento de agua caliente de la enfermedad que origina la Legionella, los estándares de Nueva Zelanda y Australia fijan una temperatura mínima en los tanques de almacenamiento de 60 °C. En contraste, temperaturas mayores a 70 °C pueden dañar el recubrimiento interior de los tanques de almacenamiento. En base a esto comúnmente se setea los equipos en un rango de entre 60 y 70°C para los sistemas de calentamiento de agua [30]. Sin embargo, de acuerdo a la norma AHSRAE 100 apartado D2.2.3 la temperatura de almacenamiento recomendada debe estar entre los 49 °C y los 52 °C:

En Uruguay el MIEM recomienda regular la temperatura máxima entre 50 y 60°C [11].

Cuanto menor sea la temperatura de almacenamiento menores serán las pérdidas térmicas al ambiente pero esto también conlleva que el tiempo de baño se verá disminuido para un mismo tamaño del tanque de almacenamiento. En caso de querer mantener el mismo tiempo de baño se necesitara incrementar el tamaño del almacenamiento lo que también aumentara las pérdidas al ambiente.

De las recomendaciones comentadas anteriormente parece una buena solución de compromiso entre todas las recomendaciones una temperatura de alrededor de los 60 °C ya que de esta forma se inhibiría el posible crecimiento de Legionella y se estaría dentro de la recomendación del MIEM. La recomendación de la ASHRAE parece demasiado baja la temperatura y esto conllevaría un tanque de almacenamiento mayor o una disminución en el confort por lo cual se considerara 60 °C como temperatura de salida y seteo de los todos los equipos (incluido el calentador instantáneo a gas para poder abastecer así los consumos de lavado de platos).

### 6.5. *Demanda total de agua del calentador*

Los consumos de agua tibia en duchas y piletas se consideran a 38 °C debido a que se determinó que la temperatura de confort en una ducha varía de persona a persona pero ronda la temperatura corporal. Sin embargo a la hora de utilizar agua para el lavado de platos, especialmente cuando estos tienen grasa y aceite se utiliza el agua caliente directamente del equipo (el cual está seteado a 60 °C y llegando al punto de consumo a esta temperatura menos las pérdidas) para poder así remover la suciedad más fácilmente. Debido a esta diferencia es que se debe lograr llevar todos los consumos a 60 °C y determinar el volumen hora a hora demandado de los equipos de calentamiento que van a recibir. Para ello se consideran las pérdidas en las cañerías para el agua de ducha y de piletas que se deben hallar iterando con las siguientes ecuaciones, considerando una cañería perdiendo directamente al ambiente como caso más desfavorable de forma de tomar un valor conservador:

$$\dot{Q}_p = \frac{T_{int} - T_{amb}}{\frac{1}{h_{int} A_{int}} + \frac{r_{ext} - r_{int}}{k_1 A_{ML}} + \frac{1}{h_{ext} A_{ext}}}$$

Siendo:

$T_{int}$  → la temperatura interna

$T_{amb}$  → la temperatura ambiente

$r_{int}$  → el radio interior

$r_{ext}$  → el radio exterior

$h_{int}$  → el coeficiente de transferencia de calor interior

$k_1$  → la conductividad del material

$h_{ext}$  → el coeficiente de transferencia de calor exterior

$A_{int}$  → el área interior

$A_{ext}$  → el área exterior

$A_{ML}$  → el área media logarítmica

Se considera conservadoramente que la temperatura de la pared interna de la cañería se encuentra a la misma que el agua que sale del sistema de calentamiento.

$$\dot{Q}_p = \frac{T_{int} - T_{amb}}{\frac{r_{ext} - r_{int}}{k_1 2 \pi L \frac{(r_{ext} - r_{int})}{\ln(r_{ext}/r_{int})}} + \frac{1}{h 2 \pi r_{ext} L}}$$

Ecuación 1.

$$\frac{\dot{Q}_p}{L} = \frac{2 \pi (T_{int} - T_{amb})}{\frac{L_n(r_{ext}/r_{int})}{k_1} + \frac{1}{h r_{ext}}}$$

$L \rightarrow$  el largo

Ecuación 2.

$$h = h_{CN} + h_{rad}$$

$h_{CN} \rightarrow$  el coeficiente de transferencia de calor por convección natural

$h_{rad} \rightarrow$  el coeficiente de transferencia de calor por radiación

Ecuación 3.

$$h_{CN} = \frac{c GrPr^d k_{aire}}{2 r_{ext}}$$

$k_{aire} \rightarrow$  la conductividad del aire

Ecuación 4.

$$GrPr = a (2 r_{ext})^3 (T_{pared} - T_{amb})$$

Siendo  $a$  dependiente de la Temperatura de film que es el promedio de  $T_{pared}$  y  $T_{amb}$ .

Ecuación 5.

$$h_{rad} = \frac{e \sigma (T_{pared}^4 - T_{amb}^4)}{(T_{pared} - T_{amb})}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K$$

$e \rightarrow$  emisividad

Ecuación 6.

$$\frac{\dot{Q}_p}{L} = h 2 \pi r_{ext} (T_{pared} - T_{amb})$$

Fuente: [82, 83]

Debido a que no existe acumulación, las pérdidas a lo largo de todas las resistencias son iguales a las pérdidas de la parte externa de la cañería hacia el ambiente.

Para simplificar la iteración se considera conservativamente la temperatura de film igual a la temperatura interna de la cañería por lo cual se obtienen los parámetros a 60 °C (140 °F)

$$a = 8,9 \times 10^5 1/ft^3 \cdot ^\circ F$$

$$k_{aire} = 0,0168 BTU/h \cdot ft \cdot ^\circ F$$

$$10^4 < GrPr < 10^9 \rightarrow c = 0,53 \quad d = 0,25$$

$$1 BTU/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F = 5.678263 W/m^2 K$$

En la Figura 25 se puede observar esquemáticamente los pasos que deben realizarse en la iteración realizada para hallar las pérdidas en la cañería desde el calentador al uso final en duchas y piletas. Una vez hallado el  $Q$  de pérdidas por unidad de longitud se busca pasarlo a pérdidas en  $^{\circ}\text{C}$ . Para esto se considera un largo de cañería de 7 metros y un flujo de 4 litros/minuto de agua caliente, debido a que se supone que se debe llegar a un flujo de 8 litros/minuto de agua tibia.

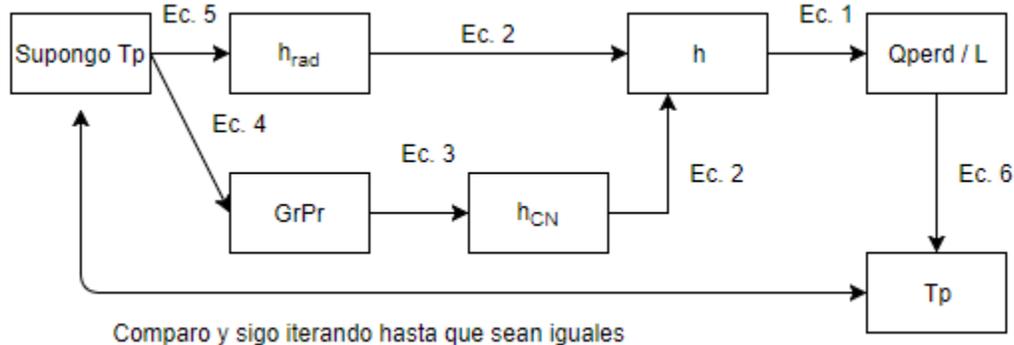


Figura 25. Esquema de la Iteración de las pérdidas en la cañería hacia el consumo de piletas y duchas (Elaboración propia).

Utilizando los siguientes valores se llega a unas  $\dot{Q}_p/L$  de 30,6 W/m.

$T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$  promedio en el interior del hogar.

$$T_{int} = 60^{\circ}\text{C}$$

Se consideran cañerías de polibutileno de  $\frac{3}{4}$ " con un

Diam exterior = 21,3 mm y un espesor = 3,4 mm,  $k = 0,22 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$  [57]

emisividad = 0,93 [58]

$$Q_{perd} = (m C_p \Delta T) L$$

$$\Delta T = \frac{30,6 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 7 \text{ m} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}} \cdot 4 \frac{\text{l}}{\text{min}} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}} = 0,8^{\circ}\text{C}$$

Se consideran  $2^{\circ}\text{C}$  como pérdidas en la cañería de manera conservadora para estar cubiertos debido a que las pérdidas varían de acuerdo a las características específicas de cada hogar. Con este valor de pérdidas se puede calcular hora a hora cuánta agua se necesitará a  $60^{\circ}\text{C}$  para cumplir la demanda ya que se conoce la temperatura de entrada del agua de red, la temperatura de uso y las pérdidas por lo cual se calcula fácilmente la cantidad de agua que se necesita extraer del sistema de calentamiento.

$$\text{Vol Agua}_{60^{\circ}\text{C}} = \text{Vol Agua}_{tibia} \frac{T_{uso} - T_{mains}}{(T_{seteo} - \text{pérdidas}) - T_{mains}} = \text{Vol Agua}_{tibia} \frac{38 - T_{mains}}{(60 - 2) - T_{mains}}$$

### 6.6. *Calentador Solar de Agua*

Se debe calcular hora a hora la temperatura presente en el tanque de almacenamiento que va a variar de acuerdo a la Irradiación incidente, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el agua demandada.

Se modelara el CSA de acuerdo a las Especificaciones Técnicas Uruguayas de Instalaciones Solares Térmicas (ETUS), las cuales establecen que [55]:

- Para poder cumplir con las pérdidas térmicas permitidas en el acumulador, se debe cumplir con un aislamiento que presente un espesor mínimo de 50 mm de un material de conductividad térmica de 0,04 W/m K o equivalente. Este aislante debe ser protegido adecuadamente frente a los agentes atmosféricos y debe resistir y evitar abolladuras por lo que comúnmente se utiliza acero inoxidable o aluminio. El aislamiento térmico de las tuberías debe tener un espesor mínimo de 24 mm de un material de conductividad 0,04 W/m K o equivalente. Además, debe disponer de una protección mecánica, rígida o flexible.
- Es obligatorio que se instale una válvula mezcladora para proteger contra quemaduras y para dar estabilidad y regular la temperatura de suministro.
- Se puede utilizar sistemas termosifónicos o de circulación forzada pero solo se admiten sistemas indirectos. Esto se debe a que se busca no reducir la fiabilidad al introducir agua de red en el colector debido a los depósitos de cal ya que estos provocan pérdidas en el rendimiento y pueden llegar a impedir la circulación. Además se busca protección frente a las heladas.
- Se permiten tener instalado solamente el equipo solar o este con un sistema de respaldo siempre y cuando el sistema de apoyo no este incorporado al acumulador ya que esto está prohibido. Los sistemas de respaldo pueden ser instantáneos o estar en un acumulador auxiliar.
- El volumen del acumulador no podrá ser inferior a  $60 * \text{Área del colector (m}^2\text{)}$  siendo el recomendado  $75 * \text{Área del colector (m}^2\text{)}$ .
- La temperatura máxima de uso siempre será inferior a 60 °C para evitar quemaduras. Las pérdidas térmicas hasta el punto de consumo producirán una caída de temperatura que siempre será inferior a 3 °C.

En base a los lineamientos propuestos por las ETUS se toman los siguientes parámetros:

- Se modela un equipo termosifónico
- Tanque de almacenamiento:
  - Volumen 150 L (Dext = 0,585 m, Largo = 0.981 m)
  - Aislado con 50 mm de un aislante con  $k = 0,04 \text{ W/mK}$
  - Cubierta exterior de metal con  $e = 0,075$
- Al equipo de respaldo le llega una temperatura regulada por la válvula mezcladora igual a:
  - La temperatura del Tanque - pérdidas si esta es menor a Temp de seteo + perdidas en la cañería.
  - La temperatura de seteo si la temperatura del tanque es mayor.

- Colector:
  - Área de apertura de 2,33 m<sup>2</sup>.
  - Eficiencia:

Las ETUS proponen para cuando no se dispone de los resultados de ensayo del colector tomar como valores tipo [55]:

- Para el colector plano con absorbedor no selectivo:
  - Factor de eficiencia óptica del colector:  $FR(\tau\alpha) = \eta_0 = 0,80$
  - Coeficiente global de pérdida FRUL en  $W/(m^2 \cdot K) = 6,0$
- Para el colector plano con absorbedor selectivo:
  - Factor de eficiencia óptica del colector:  $FR(\tau\alpha) = \eta_0 = 0,75$
  - Coeficiente global de pérdida FRUL en  $W/(m^2 \cdot K) = 4,0$
- Para el colector de tubos de vacío:
  - Factor de eficiencia óptica del colector:  $FR(\tau\alpha) = \eta_0 = 0,70$
  - Coeficiente global de pérdida FRUL en  $W/(m^2 \cdot K) = 2,0$

La eficiencia instantánea se calcula como [55]:

$$\eta = FR(\tau\alpha) - FRUL \left( \frac{T_i - T_a}{G} \right)$$

Se utilizara un colector de tubos de vacío ya que en el marco del plan solar se han instalado 1869 instalaciones de las cuales aproximadamente el 60% son con colectores de tubos de vacío y 40% son colectores de placa plana. Por lo cual se tomara un  $\eta_0 = 0,70$  y un  $FRUL = 2,0$ .

Se calcula hora a hora el calor útil ( $Q_{\text{útil}}$ ) obtenido, la temperatura del tanque de almacenamiento y las pérdidas al ambiente del tanque y de las cañerías.

$$Q_{\text{útil}} = A G \eta = A (0,7 G - 2 (T_i - T_a))$$

Siendo G la radiación recibida por el colector (en el plano de 45 grados),  $T_i$  la temperatura del tanque y  $T_a$  la temperatura ambiente.

Para la cañería que lleva el agua al equipo de respaldo y las paredes del tanque de almacenamiento se deben calcular las perdidas hora a hora, por lo cual se debe realizar una iteración similar a la realizada anteriormente pero para cada hora del año donde se considera la convección forzada debido al viento en vez de la convección natural.

#### Ecuación 1.

$$\frac{\dot{Q}_p}{L} = \frac{2 \pi (T_{\text{int}} - T_{\text{amb}})}{\frac{L_n(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})}{k_a} + \frac{1}{h r_{\text{ext}}}}$$

Ecuación 2.

$$h = h_{CF} + h_{rad}$$

$h_{CF}$  → el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada

Ecuación 3.

Se utiliza la ecuación de Mc. Adams y Klein para calcular el coeficiente de convección forzada [56].

$$h_{CF} = 5,7 + 3,8 v_{viento}$$

Sin embargo, para poder utilizar la información de velocidad del viento informada por el LES, esta se debe corregir ya que la altura informada es a 10 metros de altura y normalmente los CSA se ubican en los techos de las casas que se encuentran a unos 3 metros de altura normalmente. Para ello se utiliza la ecuación del Wind Energy Handbook considerando un  $z = 0,7$  que es el recomendado para ciudades [59].

$$v_{viento} = \frac{L_n(3 \text{ m}/z)}{L_n(10 \text{ m}/z)} v_{viento \text{ a } 10m}$$

Ecuación 4.

$$h_{rad} = \frac{e \sigma (T_{pared}^4 - T_{amb}^4)}{(T_{pared} - T_{amb})}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ecuación 5.

$$\frac{\dot{Q}_p}{L} = h 2 \pi r_{ext} (T_{pared} - T_{amb})$$

Fuente: [82, 83]

En la Figura 26 se puede observar esquemáticamente los pasos que deben realizarse en la iteración para hallar las pérdidas en la cañería desde la válvula mezcladora hasta el calentador y para el cuerpo del cilindro del tanque de almacenamiento (multiplicando  $\dot{Q}_p/L$  por el largo del cilindro). Una vez hallado el  $\dot{Q}_p$  de pérdidas para la cañería se busca pasarlo a pérdidas en °C. Para esto se considera un procedimiento análogo al anterior pero con un largo de cañería de 10 metros.

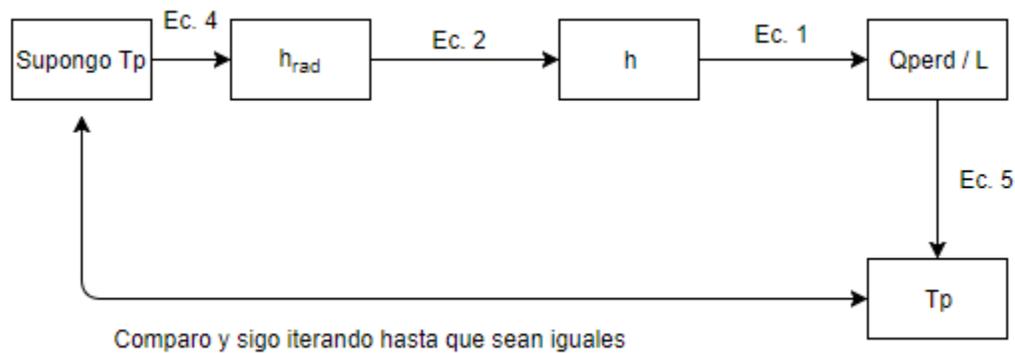


Figura 26. Esquema de la Iteración de las pérdidas en la cañería hacia sistema de respaldo y cuerpo de tanque de almacenamiento (Elaboración propia).

El cálculo de las pérdidas de las tapas del tanque de almacenamiento se calcula análogamente pero calculando directamente las pérdidas utilizando el área de las tapas.

Una vez se obtienen las pérdidas en las tapas y el cuerpo del cilindro se suman para hallar el total de pérdidas ( $Q_p$ ) en el tanque de almacenamiento en cada hora.

La nueva temperatura del Tanque de almacenamiento se calcula evaluando el aporte de la energía solar ( $Q_u$ ), las pérdidas al ambiente del tanque ( $Q_p$ ) y el agua removida del tanque para abastecer la demanda ( $V_{removido}$ ) de la siguiente manera:

$$T_{TK i} = T_{TK i-1} + (Q_{util} * 3.6 - Q_p * 3.6 - V_{removido} * 4.182 * (T_{TK i-1} - T_{mains})) / (Vol_{TK} * 4.182)$$

(el 3,6 es para convertir de Wh a kJ)

### 6.7. Sistemas considerados

De los sistemas propuestos se descartara en la simulación la opción de equipos eléctricos instantáneos debido a que los sistemas planteados deben proveer a varios puntos de demanda y normalmente estos equipos abastecen un único punto. Además, estos equipos suelen tener potencias fijas por lo cual el usuario ajusta el flujo de acuerdo a la temperatura que busca llegar y en el modelo planteado donde los eventos son generados aleatoriamente la comparación con otras tecnologías no sería correcta debido a que este equipo no podría respetar en todos los casos el flujo y la temperatura deseada. También presentan el problema de no poder instalarse con CSA debido a que aportan una cantidad de energía fija para calentar y si viene el agua caliente del CSA este elevaría la temperatura igual a que si viniera de la red. La ultima razón por la cual no se va a incluir es debido a que a nivel país, Uruguay ha desestimulado el uso de estos equipos ya que la gran mayoría no logran cumplir con las condiciones requeridas por la URSEA en el Reglamento de Seguridad de Productos Eléctrico de Baja Tensión el cual establece los requisitos esenciales de seguridad que deben cumplir todos los productos

eléctricos de baja tensión que se comercialicen en el país. Un motivo adicional es que estos equipos aumentan el pico de potencia consumida lo cual siempre se busca disminuir.

Si se pudiera instalar un calentador instantáneo eléctrico central que pueda regular la potencia en función de la temperatura de entrada, en el caso de un día de invierno donde el aporte solar es bajo o bien no se cuenta con CSA, el equipo necesitaría realizar un aumento de la temperatura del agua de unos 35 °C aproximadamente y esto para un caudal de 8 L/minuto implicaría una potencia de alrededor de 19 kW. Esta potencia es muy alta para las instalaciones residenciales de Uruguay e implicaría un estrés en la instalación eléctrica tanto de las casas como de la red de UTE volviéndola una alternativa complicada.

### **Escenario Base**

Como fue comentado anteriormente, el decreto 430/09 determinaba que para los calentadores de acumulación eléctricos era obligatorio disponer de la etiqueta energética y daba un periodo de una etapa transitoria de adhesión voluntaria que se extendió hasta Noviembre de 2012 [63, 64].

Debido a la falta de información de cómo se encuentra compuesto el parque de calentadores de agua en Uruguay y a la falta de respuesta de varias empresas contactadas para pedir información de ventas pasadas se supuso un escenario base en base a información obtenida del LATU donde se informó que la mayoría de las ventas son de origen nacional debido a que la calidad, la garantía y el servicio son mejores a las opciones importadas. Dentro de las empresas nacionales se destaca James como la empresa con más del 50% de la producción. Los calefones de 30 L clase B de etiquetado son los más vendidos debido a que para lograr un clase A se requiere mayor aislación [65]. Teniendo en cuenta que previo a 2012 no era común encontrar en los equipos etiquetado energético y la falta de información por parte de reportes y ventas de las empresas es que se tomara hipotéticamente como escenario base un calefón etiquetado como clase B con una tarifa residencial simple ya que es la más difundida en el sector residencial.

Se consideraran además del Escenario Base las siguientes tecnologías con y sin CSA:

- Calefón con una eficiencia A mínima (75%)
- Bomba de calor
- Gas con almacenamiento
- Gas instantáneo

### **Calefón con una eficiencia A mínima (75%)**

De acuerdo a la norma UNIT 1157:2011, 3ra revisión las clases de eficiencia energética se definen de acuerdo a lo presentado en la Tabla 25 [22].

*Tabla 25. Etiquetado energético de acuerdo a la Norma UNIT 1157:2011, 3ra revisión.*

CLASE	EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)
A	$EE \geq 75$
B	$75 > EE \geq 68$
C	$68 > EE \geq 61$
D	$61 > EE \geq 54$
E	$54 > EE \geq 47$
F	$47 > EE \geq 40$
G	$40 > EE$

Fuente: [22]

Calculándose la eficiencia con la siguiente formula, siendo  $C_n$  la capacidad nominal del calefón en litros y  $Q_{pr}$  las pérdidas en kWh día:

$$EE (\%) = \frac{5,815 C_n}{Q_{pr} + 0,05815 C_n}$$

Por lo cual para lograr una etiqueta de clase A se debe tener una eficiencia del 75% o mayor. Utilizando una  $EE = 75\%$  y una capacidad nominal ( $C_n$ ) de 60 litros que es lo promocionado por UTE en el Plan Recambio de Termotanques [45] se puede obtener las máximas perdidas admitidas a lo largo de un día.

$$Q_{p \max} = (5,815 C_n) / EE - 0,05815 C_n = 1,16 \text{ kWh/día}$$

Para calcular la energía consumida hora a hora se utilizan estas pérdidas dividido 24 h/día y se le suma el total de agua demandada hora a hora ( $m$ ) por  $C_p$  por la diferencia de temperatura entre la temperatura de seteo y la de entrada del agua (en el caso donde se utiliza CSA es la de salida de la válvula mezcladora menos las perdidas). Se considera que la eficiencia de conversión de la resistencia eléctrica es 1.

Sin CSA:

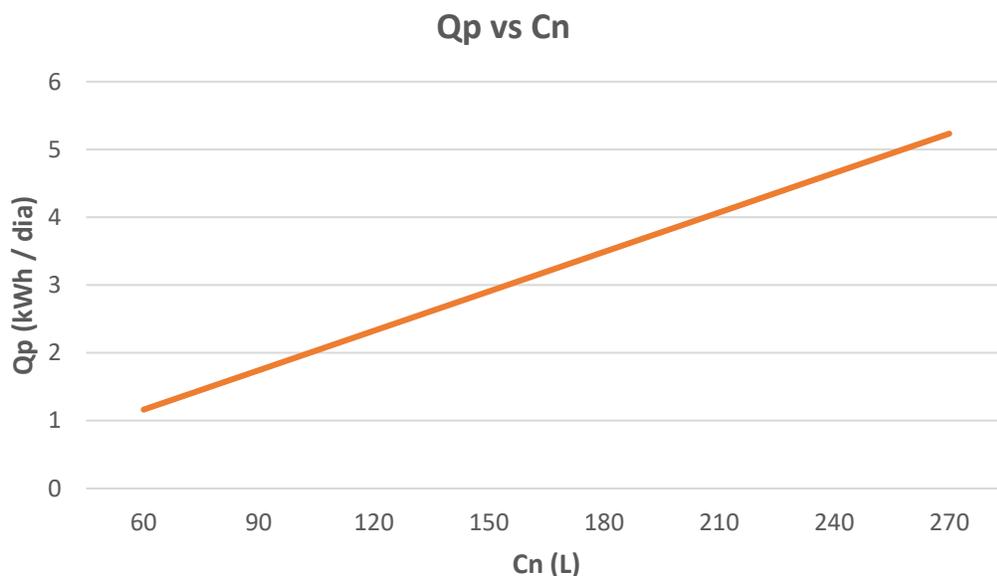
$$E_{cons} = \frac{Q_{p \max}}{24} + m C_p (T_{seteo} - T_{mains})$$

Con CSA:

$$E_{cons} = \frac{Q_{p \max}}{24} + m C_p (T_{seteo} - T_{de \text{ CSA}})$$

## **Bomba de calor**

A la hora de estimar las pérdidas se buscó modelarlas de la misma forma que para el calefón suponiendo también una eficiencia A mínima de 75% pero como se puede ver en la Figura 27, al aumentar la capacidad nominal del equipo las pérdidas aumentan significativamente.



*Figura 27. Gráfica de pérdidas de los calentadores en función de su volumen de acuerdo a la norma UNIT 1157:2011, 3ra revisión (Elaboración propia).*

Los equipos que utilizan bombas de calor presentan una potencia calorífica menor que los calefones por lo cual normalmente se fabrican con volúmenes sensiblemente mayores a ellos (100 L en adelante) por lo cual las pérdidas asociadas en caso de utilizar esta norma son muy superiores a las declaradas por los fabricantes. Debido a esto, se utilizaron para modelar el sistema las pérdidas informadas por los fabricantes adaptadas a las condiciones de operación:

Se tomó por ejemplo un fabricante que informa unas pérdidas de 0.74 kWh/día para un salto de 20 a 45 °C, por lo cual se adapta este valor considerando que el agua dentro del equipo se encuentra seteada a 60 °C y considerando una temperatura ambiente de 18 °C obteniéndose:

$$\dot{Q}_p = 0,74 / 25 * (60 - 18) = 1,24 \text{ kWh / día}$$

Staffell et. al. (2012) realizó un estudio para determinar la variación del COP con la diferencia de temperatura donde recopiló información de los fabricantes y realizó pruebas llegando a la gráfica en la Figura 28 [60].

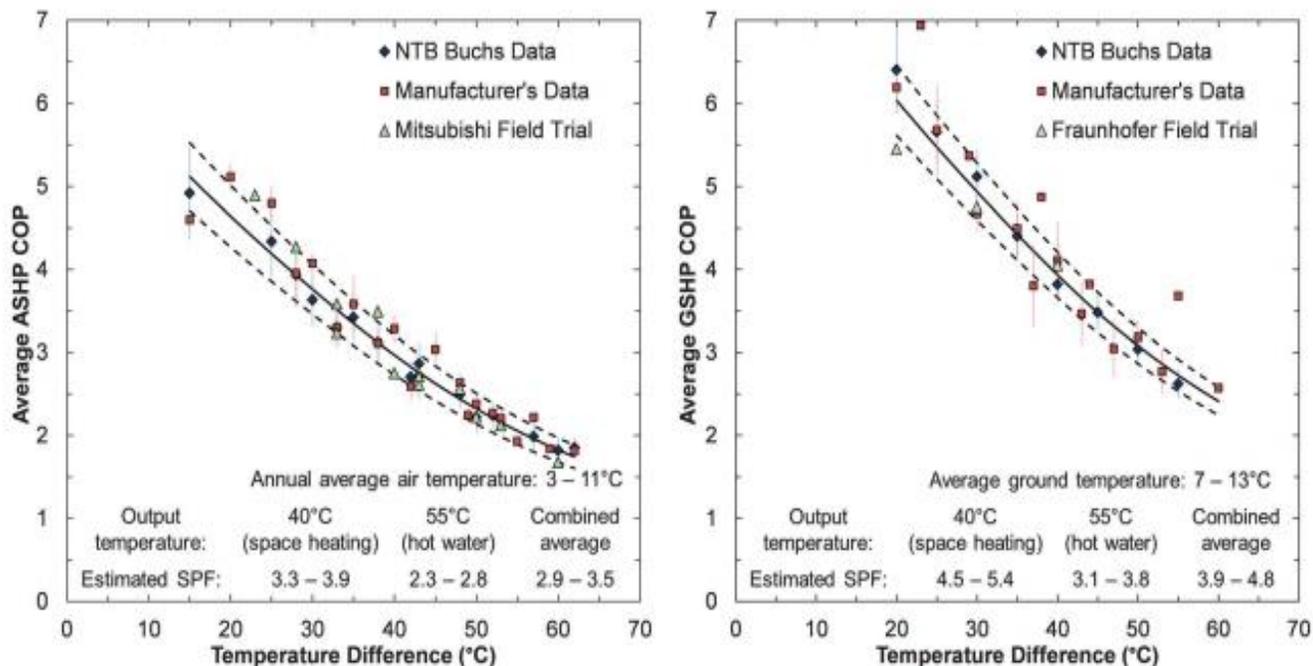


Figura 28. COP promedio de calentamiento para bombas de calor utilizando aire y tierra como fuente de calor (izquierda y derecha respectivamente) [60].

Las curvas se pueden ajustar de acuerdo a la siguiente ecuación de segundo grado para un sistema a aire.

$$COP = 6.81 - 0.121 \cdot (T_{int} - T_{amb}) + 0.00063 \cdot (T_{int} - T_{amb})^2$$

$$\text{Para } 15 \leq \Delta T \leq 60$$

Fuente: [60]

Tanto la temperatura externa como la de salida cambian en el tiempo y a lo largo del año por lo cual el  $\Delta T$  va cambiar todo el tiempo. Entonces, debemos medirlas o estimarlas constantemente para calcular el COP [60]. Para obtener el COP hora a hora se consideró conservadoramente la temperatura interna como 60 °C y la temperatura ambiente como la temperatura exterior ya que el equipo debe instalarse en un lugar bien ventilado. Los resultados se observan en la Figura 32.

**Equipos a gas**

Para los equipos a gas es difícil obtener datos de eficiencia ya que se debe tener en cuenta como ya fue comentado en la descripción de las metodologías varios factores que reducen la eficiencia como las pérdidas al ambiente, la eficiencia de combustión y el tiraje.

Debido a esto es que se dimensionaron los equipos tomando en cuenta las mínimas eficiencias requeridas para que un equipo sea catalogado como Energy Star (Tabla 26). Esta eficiencia es informada como Energy Factor (EF) y como fue comentado previamente este tiene en cuenta todas las pérdidas del equipo.

Tabla 26. EFs mínimos permitidos para los equipos a gas certificados Energy Star [16].

Gas Storage	≤ 55 gallons: EF ≥ 0.67 > 55 gallons: EF ≥ 0.77
Gas Tankless	EF ≥ 0.90

Se consideró entonces para el sistema a gas con almacenamiento un EF de 0,67 y para el sistema a gas instantáneo un EF de 0,9. Para calcular la energía demandada por el equipo se divide la energía requerida para elevar la temperatura del agua dividido el EF como fue realizado por Sanders et. al., de la siguiente forma:

$$\text{Energía consumida} = \frac{m C_p \Delta T}{EF}$$

Fuente: [32]

### 6.8. Tarifas

De las tarifas eléctricas se tomaran de las antes mencionadas la residencial simple y la doble horario residencial debido a que la básica residencial presenta la limitación en potencia de un máximo contratado de 3,7 kW y se pueden tener consumos mayores a 230 kWh /mes 2 meses al año solamente.

En la tarifa doble horario, debido a que la generación de eventos es aleatoria en base a la distribución de probabilidad, los consumos podrán caer en cualquier momento del día por lo que dependerá de la hora el precio que aplicara. Siendo el precio de punta entre las 17 y las 23 y el de llano en el resto de las horas del día.

En cuanto a la tarifa residencial simple se asignara al calentamiento de agua el final del costo total de la factura del hogar modelado debido a que este representa el ahorro potencial que podría obtenerse en la factura con un cambio de tecnología. De acuerdo al Informe del Sector Residencial realizado por el MIEM el 37% del consumo de energía eléctrica está asociado con el calentamiento de agua por lo cual a la hora de calcular el precio asociado al calentamiento de agua en base al requerimiento de energía se realizara de la siguiente forma:

$$\text{Costo} = \text{Costo}(Econs [kWh] / 0.37) - \text{Costo}(Econs [kWh] / 0.37 * 0.63)$$

O sea,

$$\text{Costo} = \text{Costo Total del hogar} - \text{Costo no asociado al calentamiento de agua}$$

En cuanto al costo del gas se tomara como se comentó anteriormente los costos publicados de GLP y de Gas Natural de Montevideo Gas. Además, se utilizara el poder calorífico informado por los proveedores para poder obtener las necesidades de los energéticos y así llegar a un precio final (GLP 11.800 kcal/kg (3,2 \$/kWh), GN 9.300 kcal/m<sup>3</sup> N (2,8 \$/kWh)).

En ninguno de los casos se consideraran costos fijos, costos por potencia contratada, energía reactiva, costos de conexión, etc. ya que se considera que el energético está disponible y el costo es puramente de consumo de energía. Si se considera el IVA ya que el consumidor residencial no puede exonerarlo.

### 6.9. Comparación económica

Para realizar la comparación económica de las distintas alternativas planteadas debemos lograr poder comparar todas las alternativas bajo las mismas condiciones por lo cual se debe tener en cuenta además del costo anual que representa cada una por el consumo energético, los costos de inversión y mantenimiento que estas presentan. Por ello es que se utilizara para comparar el Periodo de Repago Simple, la Tasa Interna de Retorno y el Valor Presente Neto de cada una de las alternativas [61].

El Periodo de Repago Simple o Payback simple se obtiene al dividir la inversión inicial sobre el ahorro menos los costos incrementales de mantenimiento anuales. [61].

$$\text{Periodo de Repago} = \frac{\text{Inversion Inicial}}{\text{Ahorro energetico} - \text{costo incremental de mantenimiento}}$$

Se obtiene una cantidad de años en que la inversión tardara en pagarse. Este valor debe compararse con la vida útil del equipo ya que si el Payback es mayor a la vida útil entonces la inversión no será rentable [61].

La tasa interna de retorno (TIR) mide la rentabilidad de una inversión y la expresa como una tasa de interés que se obtiene al invertir en la opción [61].

El Valor Presente Neto (VPN) permite calcular el valor presente del flujo de fondos futuro que se origina por realizar una inversión en una determinada alternativa. Este indicador permite evaluar en el tiempo 0 (hoy en día) el valor de los flujos de dinero futuro y por eso es que se requiere considerar una tasa de descuento. En este caso se considerara una tasa de 10%. Un VPN mayor a 0 indica que la inversión devuelve más ingresos que la tasa considerada y viceversa si es menor a 0.

En base a estos tres indicadores se evaluarán las distintas alternativas considerando los costos de inversión y mantenimiento. En base a un relevamiento de mercado donde se consultaron varios proveedores y se promedió para obtener un único valor representativo para cada equipo, se obtuvieron los valores representados en la Tabla 27, que serán los utilizados en los cálculos. En el costo de Inversión se considera el costo del equipo más la instalación del mismo. Por más de que algunos sistemas pueden abastecer la demanda de todo el hogar mientras que otros comúnmente se disponen más localizados para ciertos consumos, se modelara un único equipo para cumplir con toda la demanda del hogar.

Tabla 27. Costos de inversión y de mantenimiento anuales para las distintas alternativas consideradas (Elaboración propia).

	<b>Costo Inversión</b>	<b>Costo Mantenimiento Anual</b>
<b>Calefon A (60 l)</b>	\$ 8.369	-
<b>Bomba de calor (100 l)</b>	\$ 34.800	\$ 1000
<b>Gas con almacenamiento (50 l)</b>	\$ 12.900	\$ 2.020
<b>Gas Instantáneo (12 l/min)</b>	\$ 17.703	\$ 2.020
<b>CSA (150 l)</b>	\$ 49.590	\$ 1000

De acuerdo a la Especificaciones Técnicas Uruguayas de Instalaciones Solares Térmicas, las operaciones de mantenimiento deben ser las necesarias para que el sistema funcione correctamente durante su vida útil incluyendo mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. En el mantenimiento preventivo se incluye Inspección Visual (IV), de Control de Funcionamiento (CF), verificación de actuaciones y otros, que aplicados a la instalación deberían permitir mantener dentro de límites aceptables las condiciones de funcionamiento, prestaciones, protección y durabilidad de la instalación. El mantenimiento preventivo debe realizarse como mínimo una vez al año y en la Tabla 28 puede observarse un resumen de las tareas que deben realizarse [55].

Tabla 28. Descripción de las operaciones de mantenimiento preventivo que deben realizarse [55].

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Colectores</b>	IV sobre diferencias entre el original y entre colectores
Cristales	IV de condensaciones y humedad
Juntas	IV de agrietamientos y deformaciones
Absorbedor	IV de corrosión y deformaciones
Carcasa	IV de deformación, oscilaciones y ventanas de respiración
Conexiones	IV de aparición de fugas
Estructura	IV de degradación, indicios de corrosión y apriete de tornillos
<b>Acumuladores</b>	Presencia de lodos en el fondo
Protección catódica	Comprobación desgaste de ánodos de sacrificio o CF efectivo
Intercambiador de calor	CF efectivo y prestaciones: saltos de temperatura
Aislamiento del acumulador	Comprobar que no hay humedad
Protección al exterior	IV de degradación o indicios de corrosión
<b>Intercambiador de Calor</b>	CF efectivo y prestaciones: saltos de temperatura
<b>Circuitos hidráulicos</b>	IV fugas o manchas de humedad

Aislamiento en el exterior	IV degradación o presencia de humedad
Protección al exterior	IV de degradación o indicios de corrosión
Aislamiento en el interior	IV de uniones y presencia de humedad
Bomba circuladora	CF, estanqueidad y verificar caudal total en circulación
Purgador automático	Abrir válvula. CF y estanqueidad
Purgador manual	Vaciar aire de los botellines de purga
Sistema de llenado	CF efectivo
Vaso de expansión	Comprobación de la presión del lado aire
Válvula de corte	CF efectivo: abrir y cerrar para evitar agarrotamiento
Válvula de seguridad	CF efectivo: abrir manualmente para evitar agarrotamiento
Válvula termostática	CF efectivo y su ajuste: comparar temperaturas consigna y real
Fluido de trabajo	Comprobar densidad y pH. Verificar plan de renovación.
<b>Elementos de medida</b>	Evaluar los datos disponibles
Manómetro	Contrastar la medida con otro dispositivo
Termómetros	Contrastar la medida con otro dispositivo
Contadores caudal/energía	Registrar la medida y evaluar los datos
<b>Sistema de Control</b>	CF efectivo (man./autom.) (arranque y parada de bombas)
Termostato	CF efectivo
Sondas y sensores	Contrastar temperaturas de sensores con medidas directas
<b>Sistema auxiliar</b>	CF efectivo conexionado y control de temperaturas de consigna

CF = Control de funcionamiento, IV = Inspección visual

#### 6.10. Estudio de la variabilidad del modelo

El perfil se realiza generando para cada día del año eventos con números aleatorios que darán la hora del día en la cual este ocurre, el caudal del evento y la duración. Para cada consumo (ducha, piletas) se generan para cada día los eventos necesarios para llegar a un valor mínimo dado por la cantidad de integrantes en el hogar y los consumos diarios estimados. Debido a esta generación aleatoria en base a las distribuciones de probabilidad de flujo y duración es que para evaluar la reproducibilidad se realizaran 500 corridas considerando los mismos parámetros (misma cantidad de integrantes en el hogar) [88] y se compararan los totales anuales obtenidos en cada corrida de forma de evaluar la dispersión de los resultados para una misma cantidad de integrantes en el hogar y así comprobar que la generación aleatoria del perfil no difiera significativamente entre 2 corridas del modelo para un mismo caso.

#### 6.11. Estudio de la incidencia de los integrantes y los perfiles de consumo

Se realizaran corridas del modelo con 1, 2, 3, 4 y 5 integrantes por hogar para poder evaluar la incidencia de la cantidad de integrantes sobre los resultados. Luego para evaluar los perfiles de consumo se realizaran corridas para un hogar de 3 integrantes pero considerando que consumen -50%, -25%, +25% y +50% para poder evaluar la incidencia de la variabilidad del consumo en los resultados.

### 6.12. Simulación en Python

En el Anexo I se puede encontrar detallado y explicado el código utilizado para realizar las simulaciones en base a lo explicado anteriormente. A modo de resumen se presenta en la Figura 29 un diagrama de flujo donde se representan los pasos principales seguidos en la simulación para realizar los cálculos.

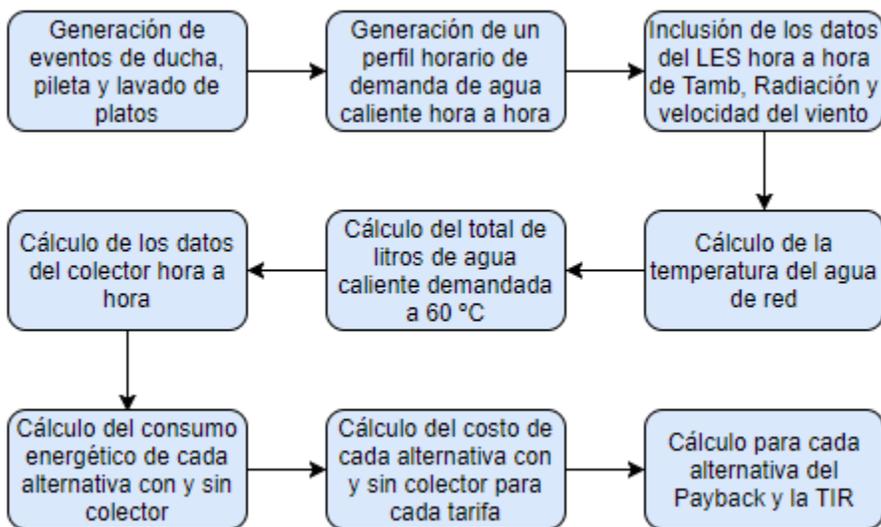


Figura 29. Esquema de los pasos principales seguidos en la simulación (Elaboración propia).

### 6.13. Simulación de escenarios de cambio de tecnología

Se estudiará el impacto que puede presentar a nivel país el cambio de 25, 50 y 75% de los equipos para calentamiento de agua de Montevideo. Se analiza Montevideo debido a que los valores obtenidos en la simulación son considerando la información del LES para Montevideo, por lo cual para otra parte de Uruguay deberían ser distintos. Se analizará como impacta este cambio en la oferta de los energéticos para cada uno de los casos y los cambios en emisiones de GHG que acompañan en cada caso. Esto se realizará al comparar con los consumos y emisiones que existen hoy en día y se verá el impacto del cambio de tecnología en, energía eléctrica, importación de gas natural y GLP y por último en emisiones de GHG.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Variabilidad del modelo

En primer lugar se realizó el estudio de variabilidad del modelo para un hogar de 3 personas (como fue comentado anteriormente es el promedio para Montevideo de personas por hogar). Para ello como se comentó anteriormente se realizaron 500 corridas independientes [88]. Se aplicó el test de Shapiro-Wilk para evaluar si los datos generados presentaban una distribución normal. En todos los casos se aceptó la hipótesis nula ( $p > 0,15$ ) lo que permite concluir que los datos generados siguen una distribución normal. En la Tabla 29 se presenta la desviación estándar como porcentaje del promedio para evaluar la reproducibilidad del modelo:

Tabla 29. Desviación estándar como porcentaje del promedio de las 500 corridas sucesivas del modelo en kWh/año y \$/año para un hogar de 3 personas.

kWh/año 3 pers	Desv. Est. (% promedio)
Bomba de calor	0.8%
Esc. Base	0.9%
Bomba de calor con Col.	0.9%
Calefón A	1.0%
Gas Inst.	1.2%
Gas con Alm.	1.2%
Calefón A con Col.	1.6%
Gas Inst. con Col.	3.2%
Gas con Alm. con Col.	3.2%

\$/año 3 pers	Desv. Est. (% promedio)
Bomba de calor Res. Simp.	0.8%
Bomba de calor con colect Doble Hor.	0.9%
Bomba de calor Doble Hor.	1.0%
Bomba de calor con colect Res. Simp.	1.1%
Gas con Alm. GLP	1.2%
Gas Inst. Gas Nat.	1.2%
Gas Inst. GLP	1.2%
Gas con Alm. Gas Nat.	1.2%
Calefón A Res. Simp.	1.3%
Esc. Base	1.3%
Calefón A Doble Hor.	1.3%
Calefón A con colect Doble Hor.	1.7%
Calefón A con colect Res. Simp.	1.8%
Gas con Alm. con colect Gas Nat.	3.2%
Gas con Alm. con colect GLP	3.2%
Gas Inst. con colect GLP	3.2%
Gas Inst. con colect Gas Nat.	3.2%

Se puede observar que la variabilidad en las sucesivas corridas es baja ya que la desviación estándar representada como porcentaje del promedio es menor al 5% tanto en kWh consumidos al año como en pesos al año. Se destaca que la variabilidad es mayor al considerar un CSA y tarifas doble horario debido a que son fuertemente dependientes del momento del consumo.

## 7.2. Hogar con 3 integrantes

### **Perfil de consumo**

Luego de realizar la simulación para un hogar de 3 personas se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación. En primer lugar se puede encontrar la Figura 30 donde se puede apreciar el consumo de agua caliente (60 °C) demandada al sistema de calentamiento de agua día a día en litros por día. Se puede apreciar claramente como independientemente de la variabilidad diaria que genera la generación de eventos aleatoria, la demanda es sensiblemente mayor en los meses de invierno y alcanza su mínimo en los meses de verano, lo cual es acorde a lo esperable debido a la menor temperatura a la cual ingresa el agua de la red en invierno y por lo tanto para lograr el agua tibia se requiere más agua caliente.

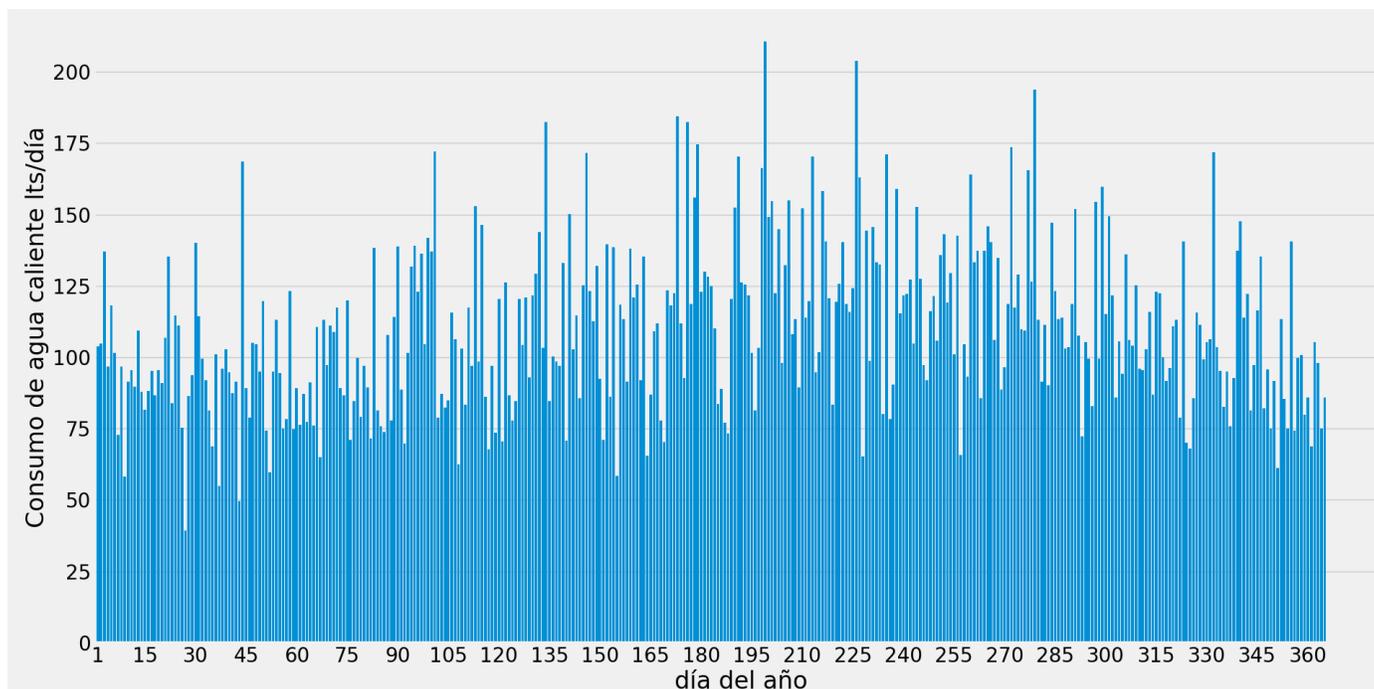


Figura 30. Demanda de agua caliente a lo largo del año para un hogar de 3 personas.

Luego, en la Figura 31 podemos observar para un día aleatorio del año la demanda de agua caliente hora a hora y el total de litros de agua caliente que se demandaron para un día específico. Es esperable que de acuerdo a las funciones de probabilidad de ocurrencia de los eventos que demandan agua caliente, que la demanda se encuentre principalmente en torno a la mañana o la

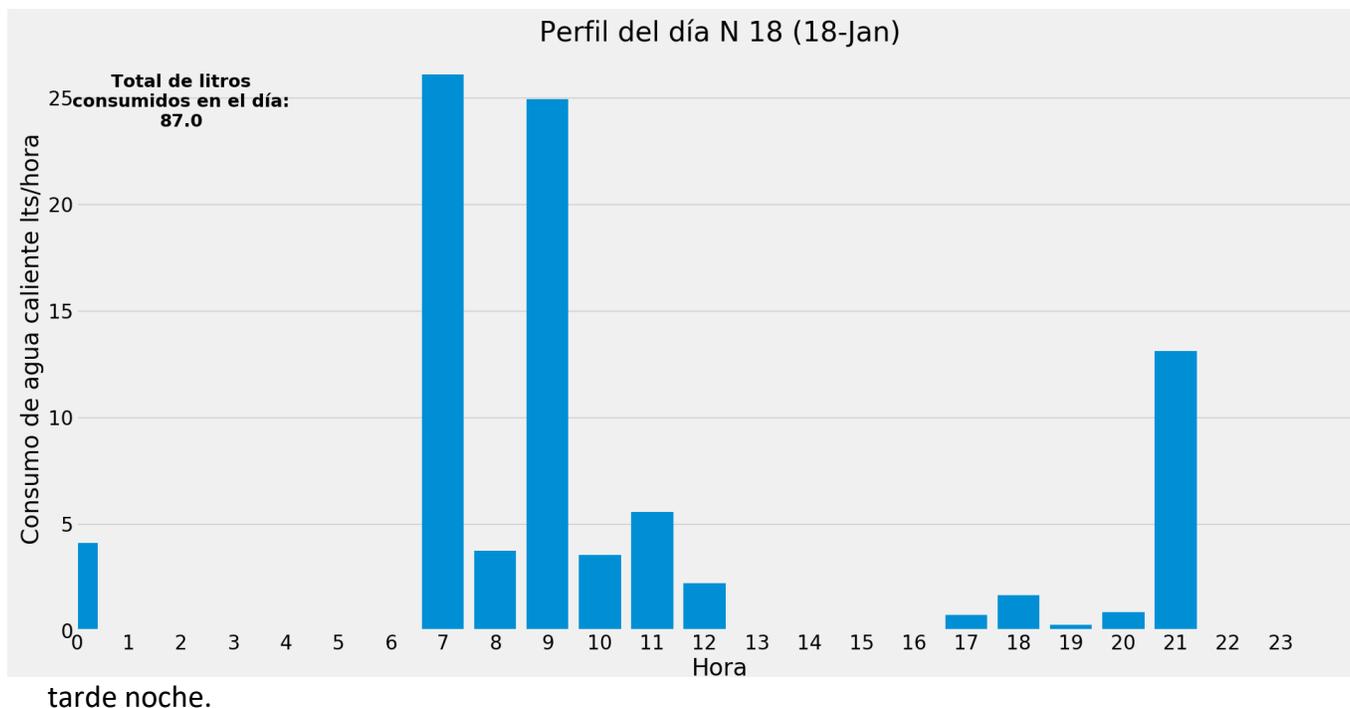


Figura 31. Demanda de agua caliente hora a hora para un día aleatorio del año para un hogar de 3 personas.

En la Tabla 30 se puede ver más específicamente para cada hora del día cual fue la demanda y de qué origen provino esta demanda. El agua tibia se considera como agua a 38 °C mientras que el agua caliente se considera como agua directamente del equipo (seteado a 60 °C llegando al punto de consumo a esta temperatura menos las pérdidas).

Tabla 30. Demanda de agua caliente y tibia hora a hora para un día aleatorio del año para un hogar de 3 personas.

Hora	Uso	Duracion [min]	Flujo [L/min]	Volumen [L] caliente	Volumen [L] tibia
0	Pileta	1.8	5.3		9.7
0	Pileta	0.2	6.5		1.5
7	Pileta	2.0	2.5		4.9
7	Pileta	0.4	2.4		1.0
7	Platos	4.5	5.3	23.9	
8	Pileta	0.5	6.6		3.0
8	Pileta	0.8	4.0		3.3
8	Platos	0.2	5.9	1.4	
9	Pileta	0.1	4.8		0.5
9	Pileta	0.6	3.6		2.0
9	Ducha	7.9	8.4		65.8
10	Pileta	1.8	5.3		9.7
11	Pileta	0.4	6.0		2.1
11	Ducha	2.8	4.8		13.1
12	Pileta	0.8	5.6		4.4
12	Platos	0.1	5.1	0.6	
17	Pileta	0.5	3.9		2.0
18	Pileta	0.7	6.5		4.5
19	Pileta	0.3	1.9		0.7
20	Pileta	0.5	4.7		2.3
21	Ducha	4.8	7.6		36.0

### **Eficiencia de los equipos**

En la Figura 32 se puede observar el COP de la bomba de calor a lo largo del año. Presenta un máximo de alrededor de 4 en verano debido a que la temperatura del aire es mayor y por lo tanto el delta de temperaturas es menor y presenta un mínimo levemente inferior a 2 en invierno debido a que las temperaturas exteriores son bajas. A lo largo del año se puede observar un COP promedio de 2.8 haciendo a esta tecnología muy eficiente desde el punto de vista energético.

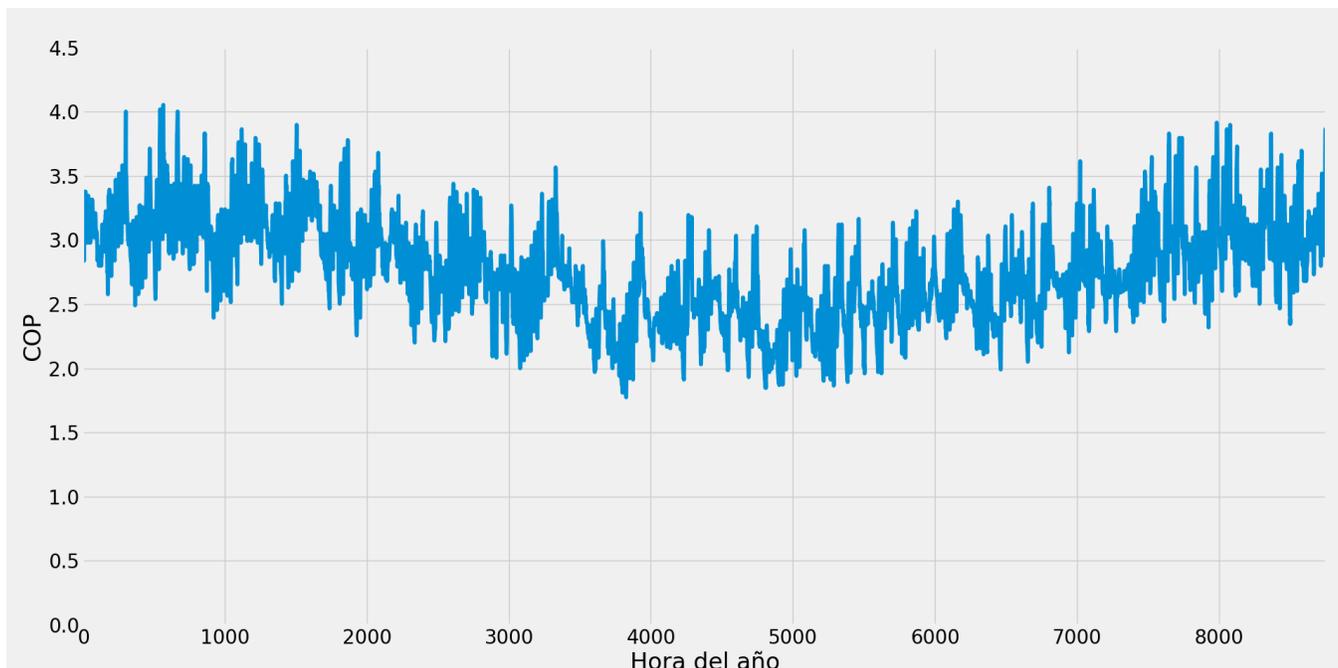


Figura 32. Rendimiento (COP) de la bomba de calor a lo largo del año.

En la Figura 33 se puede observar el rendimiento diario del colector. Se puede observar que las eficiencias mínimas se presentan en días nublados pero normalmente la eficiencia del colector se encuentra en el entorno del 50%.

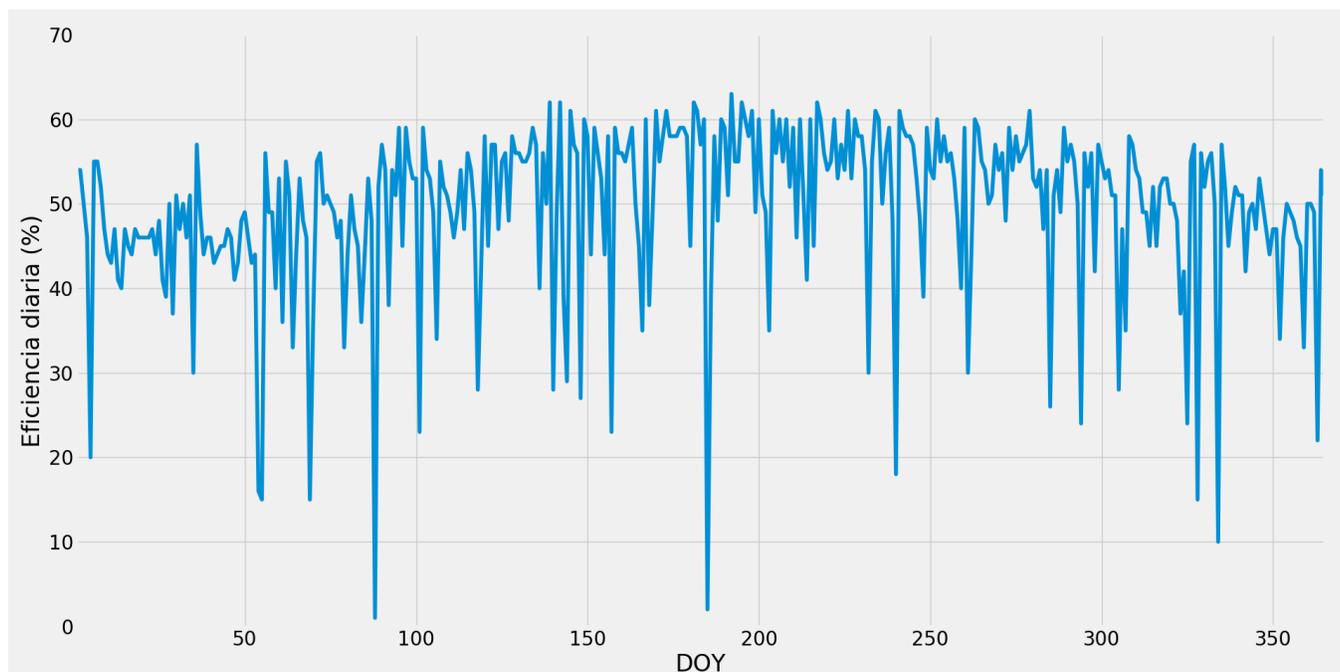


Figura 33. Rendimiento del colector diario a lo largo del año.

## Resultados anuales

En la Figura 34 se pueden observar 4 graficas que muestran el consumo energético diario de cada una de las alternativas consideradas (línea azul) en comparación con el escenario base (línea roja). En el caso donde el consumo del escenario base es mayor al de la alternativa se puede ver un sombreado verde que marca el posible ahorro energético al cambiar por la alternativa mencionada, mientras que si ocurre lo contrario el sombreado se presenta en amarillo marcando un aumento energético en el cual la alternativa considerada incurre. Por último, se puede ver el consumo energético de las alternativas si se agrega un CSA que alimente al sistema (línea naranja).

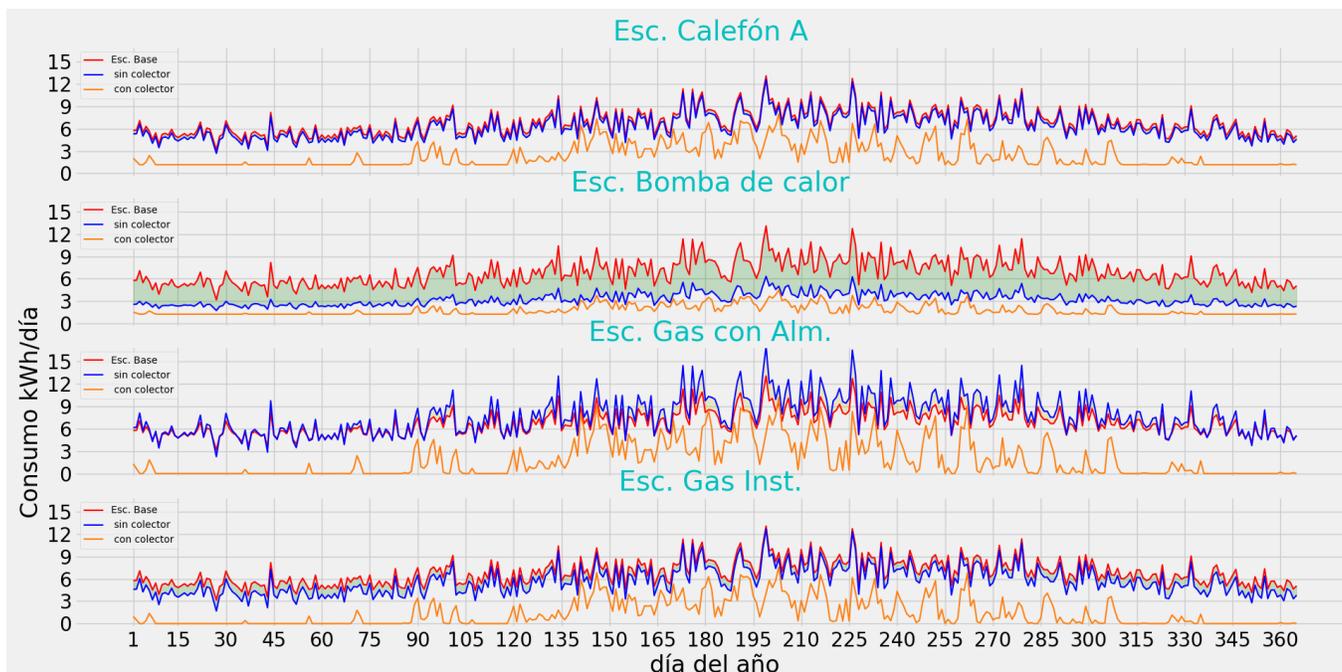


Figura 34. Consumo energético diario para cada una de las alternativas consideradas a lo largo del año para un hogar de 3 personas.

Línea roja: Escenario Base; Línea azul: Alternativa sin CSA, Línea naranja: Alternativa con CSA.

La Figura 35 es análoga a la Figura anterior pero considerando los consumos mensuales en vez de diarios. En esta Figura se puede ver más claramente el aporte del CSA ya que se ve como disminuye sensiblemente el consumo energético de las alternativas a lo largo de todo el año pero más claramente en los meses de verano donde prácticamente no se requiere aporte de los energéticos (gas o electricidad).

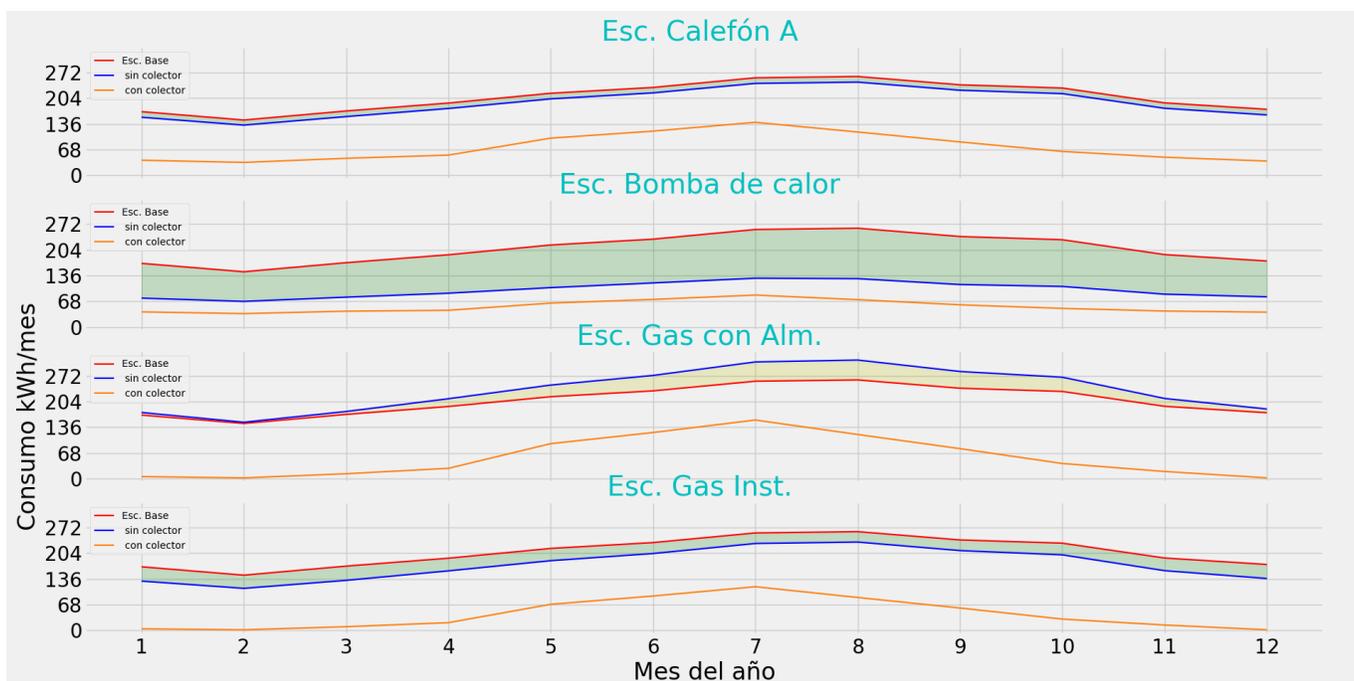


Figura 35. Consumo energético mensual para cada una de las alternativas consideradas a lo largo del año para un hogar de 3 personas.

Línea roja: Escenario Base; Línea azul: Alternativa sin CSA, Línea naranja: Alternativa con CSA.

La comparación del costo energético mensual a lo largo del año se puede observar en la Figura 36, la cual es análoga a la anterior pero se le agregan para las opciones eléctricas consideradas las tarifas residencial simple y doble horario y para las opciones a gas el Gas Natural y el GLP. Por cada alternativa se encontraron 5 líneas; Escenario base (rojo), alternativa sin CSA con cada tarifa (azul para Residencial Simple y Gas natural, violeta para Doble Horario y GLP) y alternativa con CSA con cada tarifa (naranja para Residencial simple y Gas natural, oliva para Doble Horario y GLP).

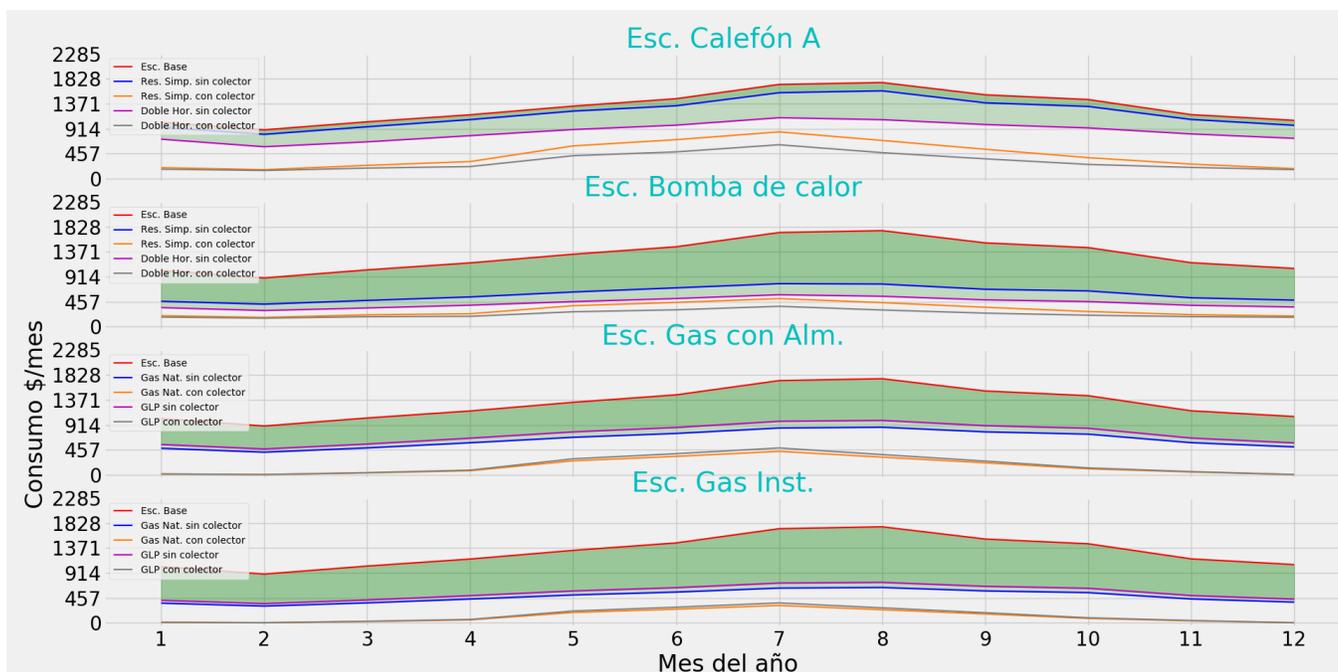
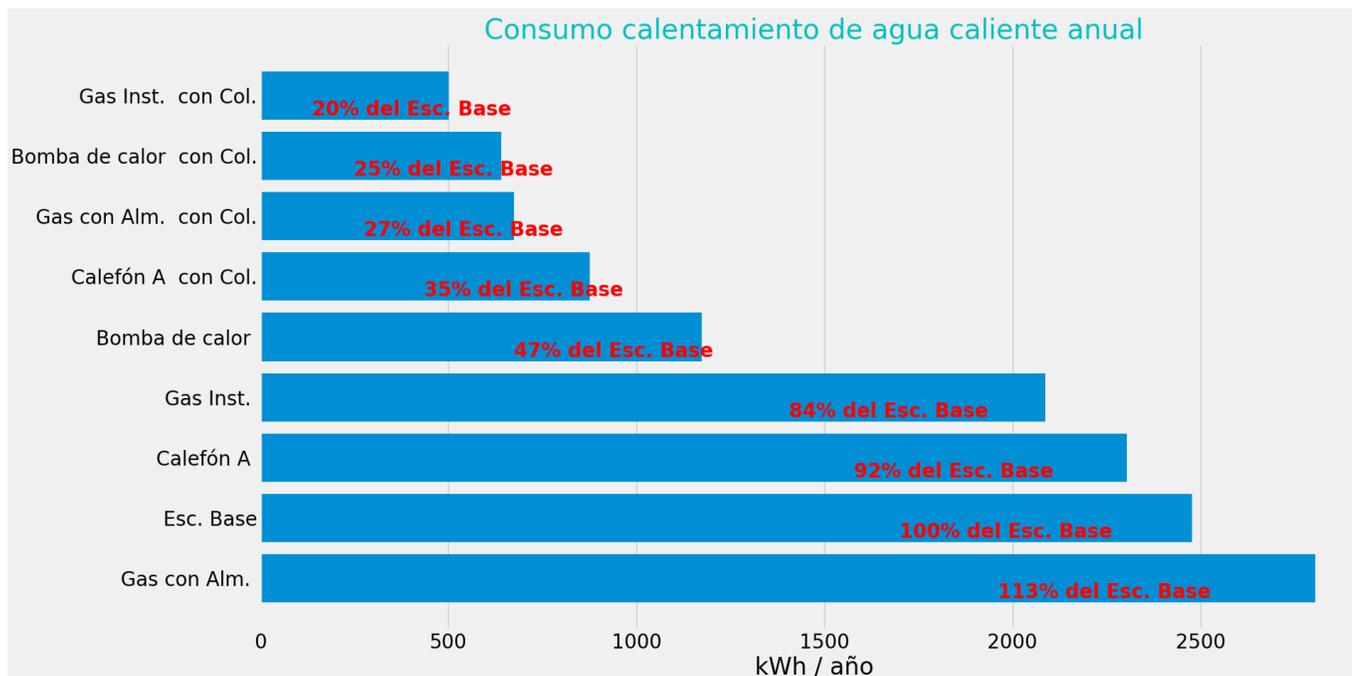


Figura 36. Costo mensual para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta las distintas tarifas y el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas.

**Línea roja:** Escenario Base; **Línea azul:** Alternativa sin CSA con cada tarifa (Residencial Simple y Gas natural), **Línea violeta:** Alternativa sin CSA con cada tarifa (Doble Horario y GLP), **Línea naranja:** Alternativa con CSA con cada tarifa (Residencial simple y Gas natural), **Línea oliva:** Alternativa con CSA con cada tarifa (Doble Horario y GLP).

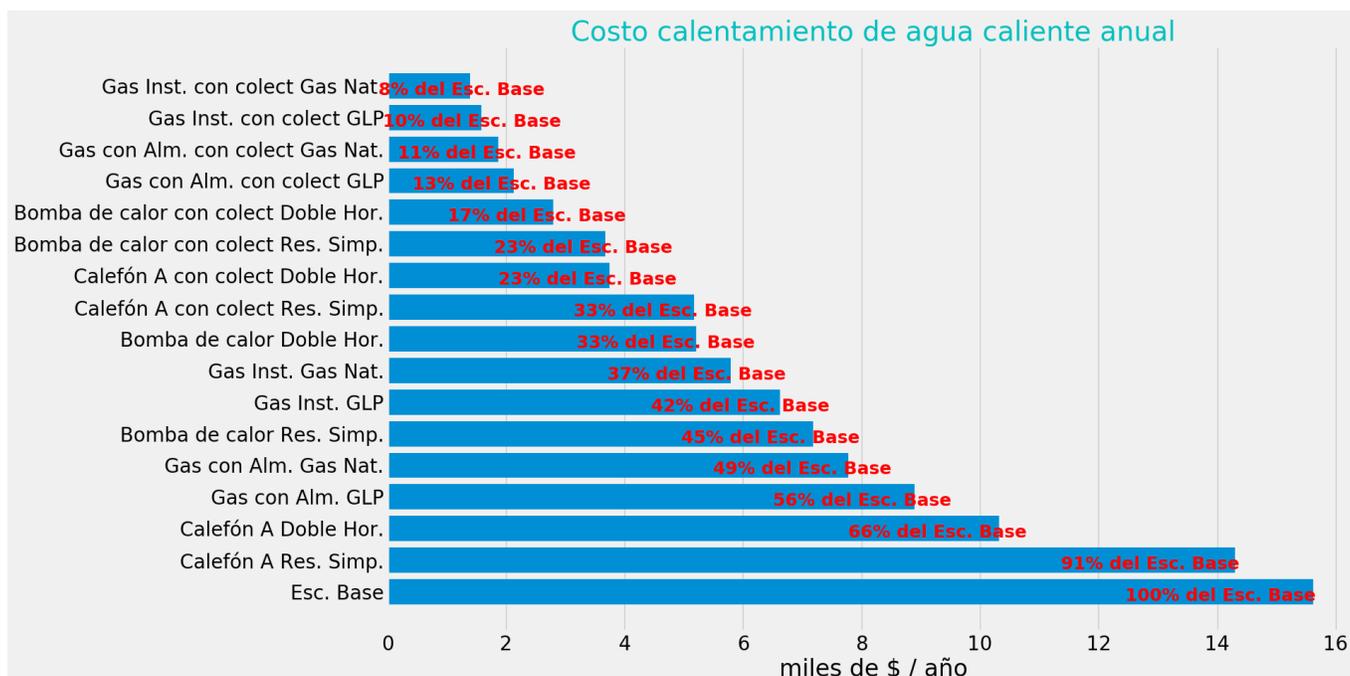
En la

Figura 37 se resumen los consumos energéticos totales en el año de cada una de las alternativas considerando y no considerando CSA. Para cada una se puede ver el porcentaje que representa del Escenario Base para tener una idea de la diferencia relativa. Se puede observar que la opción que consume más energía es la de un sistema a gas con almacenamiento mientras que la bomba de calor es la alternativa que menos consume energía. Observar que al agregar CSA se ven penalizadas las opciones con almacenamiento debido a que las pérdidas al ambiente siguen siendo las mismas pero representan un mayor porcentaje del consumo total haciendo que el sistema instantáneo a gas sea el que menos consume energía.



*Figura 37. Consumo anual de energía para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas.*

Análoga a la Figura anterior se realizó la Figura 38 pero en este caso resumen el costo total en el año sin considerar la inversión de cada una de las alternativas con cada tarifa, considerando y no considerando CSA. Para cada una se puede ver el porcentaje que representa del Escenario Base para tener una idea de la diferencia relativa. Se puede observar que, si bien en la Figura anterior el sistema a gas con almacenamiento era el que más energía consumía (13% más que el escenario base) a la hora de transformarlo a dinero, este representa aproximadamente la mitad del costo del escenario base. El sistema a gas instantáneo con CSA se presenta como el sistema que presenta menor costo energético anual al igual que se podía ver en la Figura anterior que representaba el sistema con menor consumo de energía.



*Figura 38. Costo anual para cada una de las alternativas consideradas teniendo en cuenta las distintas tarifas y el uso de CSA a lo largo del año para un hogar de 3 personas.*

A modo de resumen se puede concluir que en costo desde el punto de vista energético las alternativas más económicas son:

- Las alternativas con colector logran los menores consumos
- Dentro de los sistemas se destacan cuando el consumo es poco los equipos instantáneos a gas ya que no presentan pérdidas al ambiente pero si se aumenta el consumo la bomba de calor es más económica
- Por último aparecen los sistemas a gas con almacenamiento y los calefones eficiencia A.

En la Figura 39 se puede apreciar la comparativa de Payback y TIR de las alternativas con y sin CSA para cada una de las tarifas considerando para cada alternativa el costo de inversión, instalación y mantenimiento anual además del ahorro de cada alternativa en comparación con el Escenario Base.

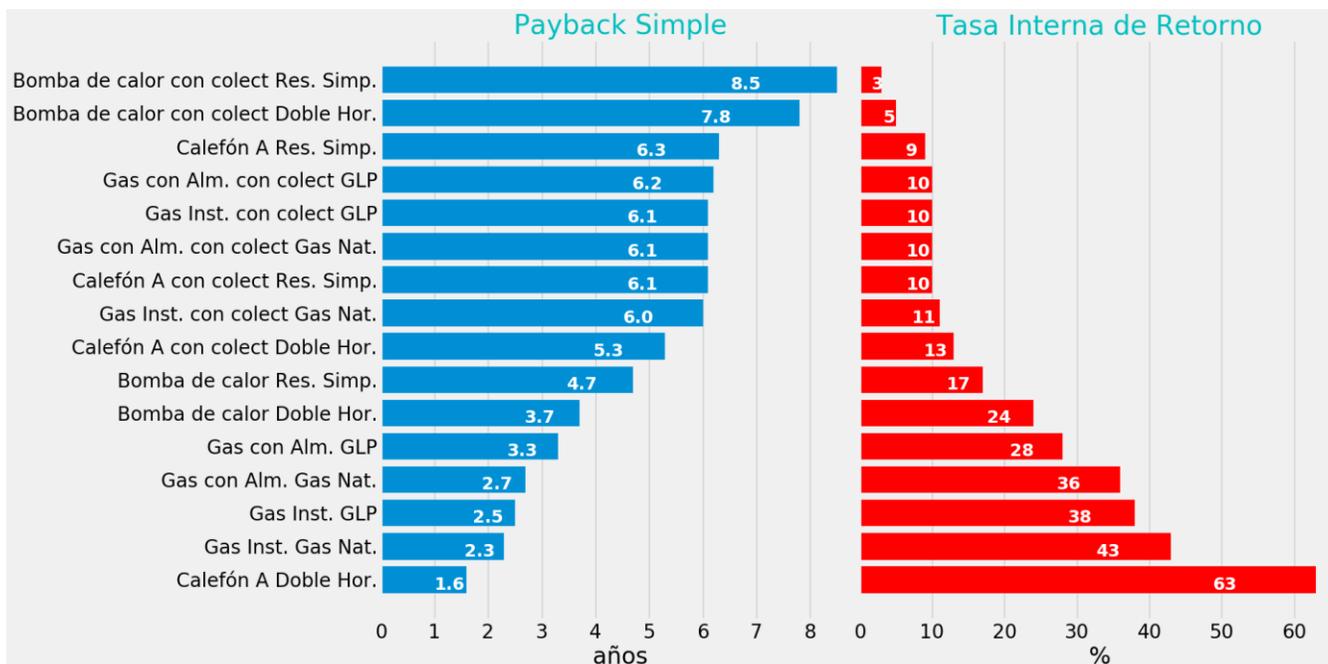


Figura 39. Payback y TIR de las alternativas con y sin CSA para cada tarifa.

Recordando la Figura 17 donde se observaba graficada la aceptación versus el Payback, se puede ver que un Payback menor a 3 años es aceptado por 60 a 80% de la gente por lo cual se podría concluir que estas alternativas serían atractivas económicamente. Teniendo en cuenta esto y observando la Figura 39 se podría decir que ninguna alternativa con CSA sería atractiva económicamente y que todas las opciones a gas sin CSA y el Calefón A son las alternativas más atractivas desde el punto de vista económico del usuario. Luego le seguiría la bomba de calor con una tarifa doble horario (menor a 4 años de payback).

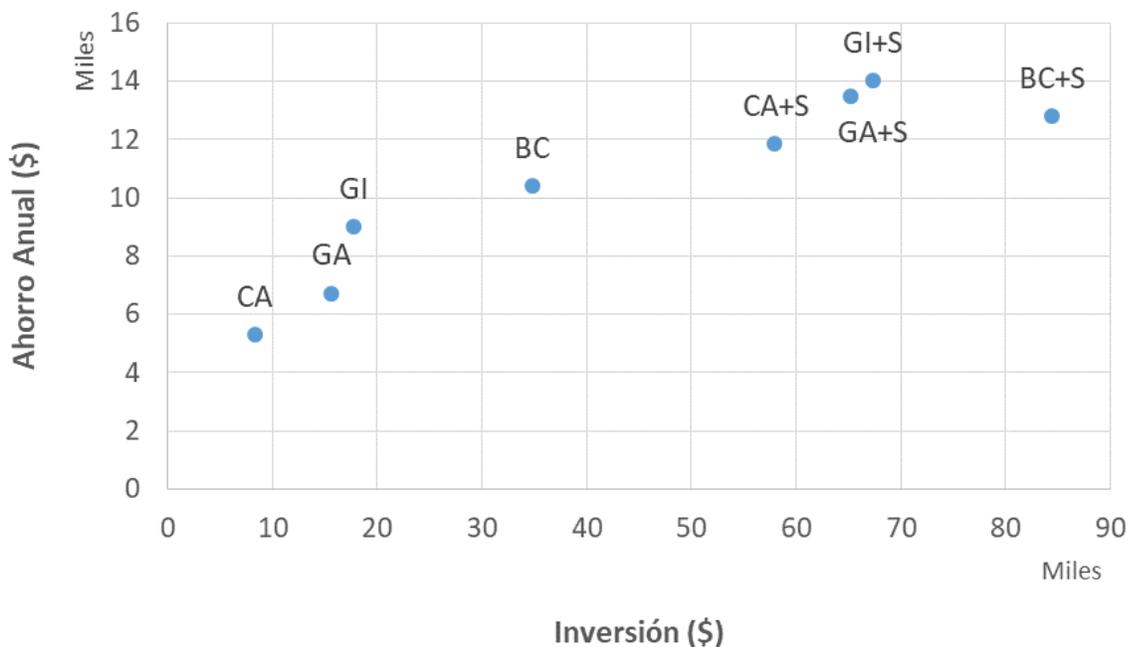


Figura 40. Ahorro versus inversión para equipos con tarifas doble horario y con GLP.

CA: Calefón A; BC: Bomba de Calor; GI: Gas Instantáneo; GA: Gas con Almacenamiento; +S: CSA

En la Figura 40 se puede observar otra forma de presentar los resultados económicos, al graficar ahorro versus inversión. Por simplicidad se consideraron solo las tarifas doble horario ya que desde el punto de vista del usuario presenta mayor ahorro y en el caso de los equipos a gas los escenarios con GLP debido a que este presenta alcance nacional y no hay una diferencia significativa respecto al gas natural.

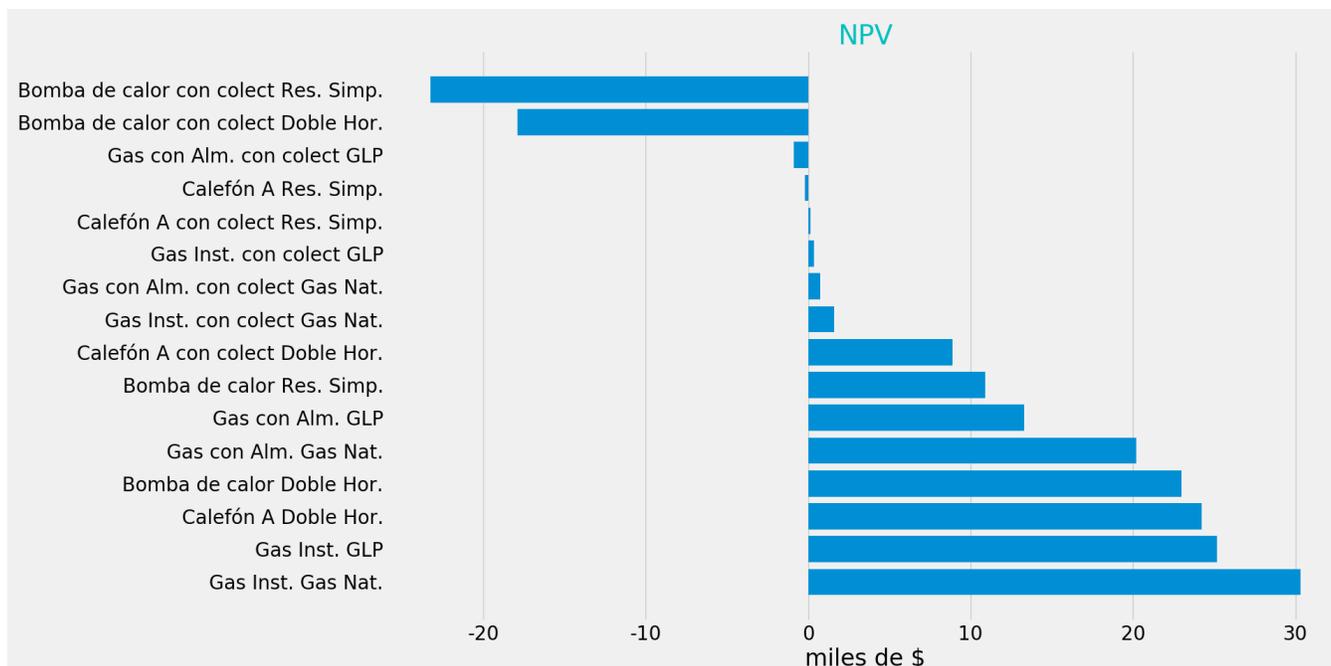


Figura 41. Valor Presente Neto de las distintas alternativas considerando una tasa de 10%.

Cuando se tiene en cuenta el Valor Presente Neto de las alternativas considerando una tasa del 10% (Figura 41) se puede ver una tendencia similar a lo observado en la gráfica anterior donde las mejores alternativas son los equipos a gas instantáneo y la bomba de calor y el calefón con una tarifa doble horario. Mientras que las opciones con colector parecen ser inviables si el equipo de respaldo es caro (bomba de calor). Por lo cual se podría concluir que desde el punto de vista económico del usuario las mejores alternativas son:

- Los equipos a gas, primero los instantáneos y luego los que tienen almacenamiento, con cualquiera de los 2 gases, pero obteniéndose un resultado levemente mejor con el Gas Natural.
- Un calefón eficiencia A con una tarifa doble horario (con una tarifa residencial simple se obtienen peores resultados que con un colector) y luego la bomba de calor.
- Por ultimo las alternativas con colector mostrando que la inversión aún es demasiado cara.

### **Casos Particulares:**

- En el caso de que se considerara un timer que cortara la energía hacia los equipos eléctricos en el horario de punta se puede observar que presentarían un problema en el confort de los usuarios debido a que en 68 de los 365 días del año se pueden observar en este horario (17 a 23 hs) una demanda mayor a 50 litros de agua caliente. La implementación de este dispositivo permitiría reducir el costo anual que implica el calentamiento de agua pero provocando un cambio en las costumbres de los hogares o una pérdida de confort. Sin embargo, en términos económicos, el ahorro anual en el costo energético se puede llegar a disminuir alrededor de un 25% respecto al uso de tarifa doble horario pero sin el uso de timer. Por último, cabe destacar que un cambio en la tarifa del Escenario base por una residencial doble horario con timer puede llegar a disminuir el costo anual en casi un 50% respecto al costo que representa el Escenario base con la tarifa residencial simple.
- Agregar un colector solar sobre el escenario base presenta un ahorro económico anual de casi un 60% si se conserva la tarifa residencial simple y de un 70% si se considera un cambio a residencial doble horario.

### 7.3. Incidencia de los integrantes y los perfiles de consumo en el consumo de agua caliente

Para poder ver la relación que tiene la cantidad de integrantes de un hogar en el consumo energético se realizaron corridas sucesivas para 1, 2, 3, 4 y 5 integrantes por hogar. Se obtuvieron los datos representados en la Figura 42, donde se puede ver como para un hogar de una persona las alternativas con CSA presentan el mínimo consumo debido a que casi toda la demanda es cubierta por el CSA mientras que a medida que se aumenta la cantidad de integrantes la bomba de calor logra los menores consumos debido a que es el equipo más eficiente. Cuando son pocos integrantes y además se agrega un CSA la bomba de calor no se presenta como la mejor opción y el calentador a gas instantáneo es mejor debido a que las pérdidas al ambiente siguen siendo constantes pero pasan a representar un porcentaje mucho mayor del consumo total penalizando así a la bomba de calor.

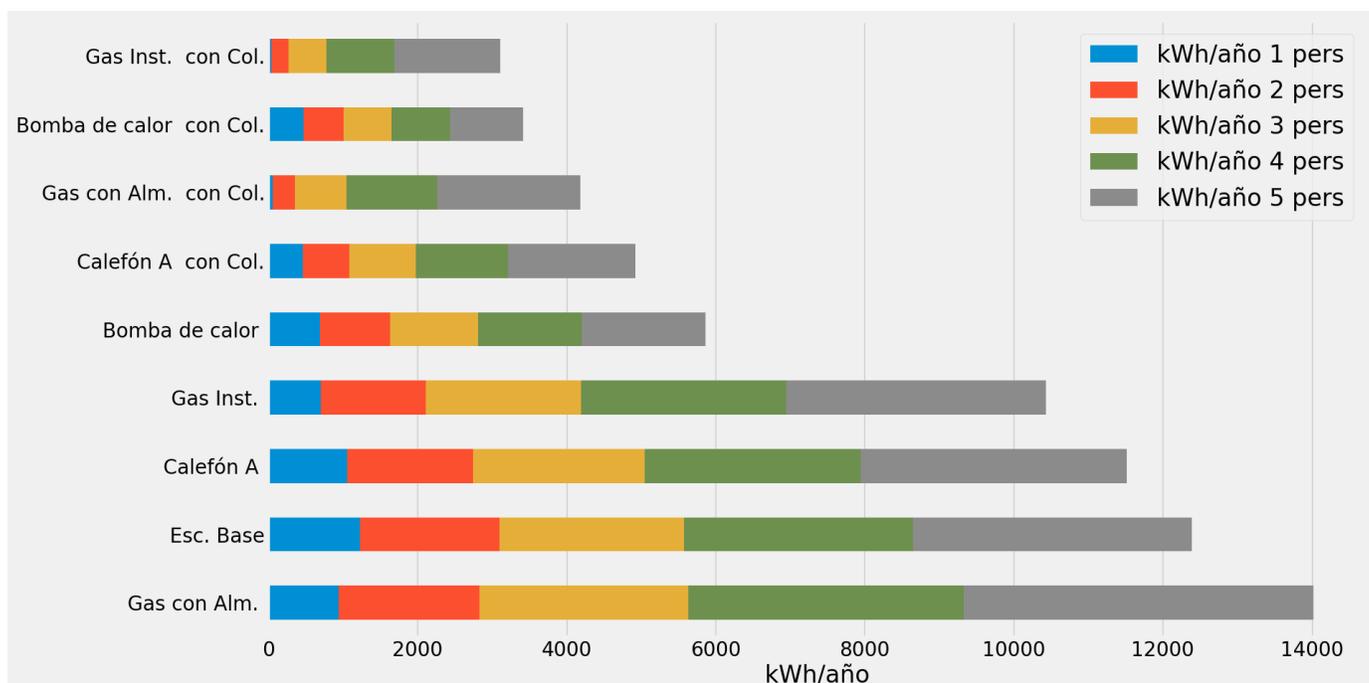


Figura 42. Comparación de consumos de energía anual para cada alternativa considerando distinta cantidad de integrantes en el hogar.

Para poder ver la relación que tiene el comportamiento de los integrantes en el consumo de agua caliente se plantearon 4 escenarios además del escenario promedio para 3 personas. En estos escenarios se supone que consumen -50, -25, +25 y +50% en relación al promedio. Se obtuvieron los datos representados en la Figura 43, donde se puede ver resultados muy similares a los obtenidos en la Figura anterior donde las alternativas con CSA presentan el mínimo consumo debido a que casi gran parte de la demanda es cubierta por el CSA mientras que a medida que se aumenta el consumo la bomba de calor logra los menores consumos debido a que es el equipo más eficiente. Cuando el consumo es chico y además se agrega un CSA la bomba de calor no se presenta como la mejor opción y el calentador a gas instantáneo es mejor debido a que las pérdidas al ambiente siguen siendo constantes pero pasan a representar un porcentaje mucho mayor del consumo total penalizando así a la bomba de calor.

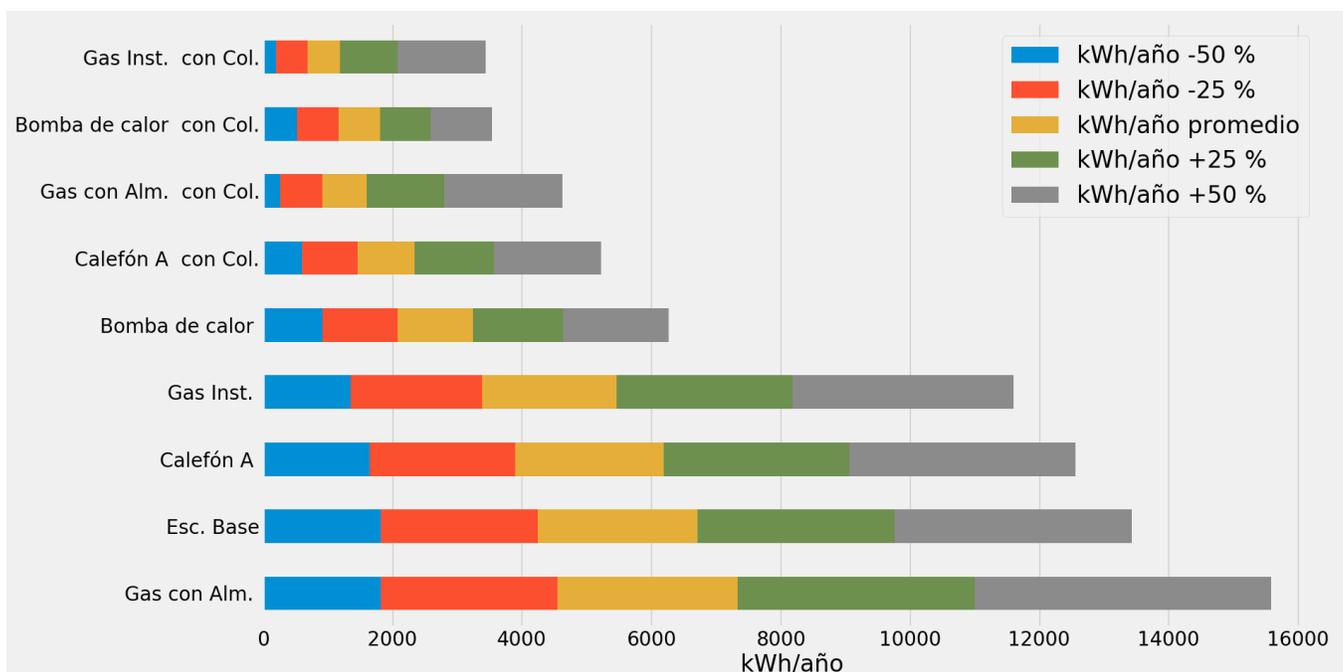


Figura 43. Comparación de consumos de energía anual para cada alternativa considerando distinto consumo para un hogar de 3 integrantes.

#### 7.4. Simulación de escenarios de cambio de tecnología

Como se explicó anteriormente se verá cómo afecta la oferta de los energéticos y su impacto en emisiones de GHG que las distintas alternativas sean adoptadas por el 25, 50 y 75% de los hogares de Montevideo.

En Montevideo existen de acuerdo al censo del INE 487 mil hogares particulares [53].

De las 500 corridas realizadas para obtener la variabilidad de las simulaciones se obtuvieron los siguientes valores promedio de consumo en kWh/año (Tabla 31):

Tabla 31. Promedio de consumo anual en kWh para un hogar de 3 personas.

	kWh/año 3 personas
<b>Bomba de calor</b>	1.172
<b>Bomba de calor con Col.</b>	645
<b>Calefón A</b>	2.303
<b>Calefón A con Col.</b>	886
<b>Esc. Base</b>	2.478
<b>Gas Inst.</b>	2.087
<b>Gas Inst. con Col.</b>	513
<b>Gas con Alm.</b>	2.804
<b>Gas con Alm. con Col.</b>	689

Del Balance Energético Nacional se obtienen los siguientes consumos a nivel país en el año 2016 para Gas Natural y GLP, mientras que la generación de Energía Eléctrica se obtiene del reporte de UTE en cifras del 2016 (Tabla 32).

Tabla 32. Consumos energéticos de Gas Natural, GLP y Energía Eléctrica de Uruguay en el año 2016.

	GWh	Obs.
<b>GN</b>	291	
<b>GLP</b>	1.334	
<b>Energía Eléctrica generada</b>	11.860	3,4% térmica

Para las emisiones de GHG se consideraran para Gas Natural 2,1 kg CO<sub>2</sub>/ m<sup>3</sup> y para GLP 3,03 kg CO<sub>2</sub>/kg, se toma de forma conservadora el mayor de las bibliografías relevadas de forma conservativa pero cabe destacar que ambos valores no presentan una diferencia mayor al 10% [76, 81]. Para Uruguay se consideran unas emisiones totales de 7.395 ktons CO<sub>2</sub>/año. [77]. En el 2016 solamente un 3,4% de la Energía Eléctrica generada provino de fuentes térmicas y en 2017 se instaló más Energía Eólica por lo cual las emisiones provenientes de la Energía Eléctrica son bajas debido a que casi toda la energía proviene de energías renovables. En los factores de conversión informados por la DNE se encuentra que el valor recomendado para electricidad es de 0,44 ton CO<sub>2</sub>/MWh sin embargo este valor se encuentra desactualizado y actualmente para instrumentos de la DNE como el Premio

Nacional de Eficiencia Energética y los Certificados de Eficiencia Energética se están utilizando 0,15 ton CO2/MWh. Se debe tener en cuenta que este valor varia año a año dependiendo de la disponibilidad de renovables (especialmente hidráulica). Por ejemplo, en el año 2016 se obtuvo un valor de 0,028 ton CO2/MWh (Balance Energético Nacional), el cual se utilizara para realizar los cálculos de emisiones generadas en las migraciones a opciones a gas.

En la Tabla 33 se pueden apreciar los resultados al cambiar por Calefones Eficiencia A y Bombas de calor los distintos porcentajes de hogares. Se puede apreciar que el impacto sobre el ahorro en el consumo de energía eléctrica nacional es relativamente pequeño pero si se compara con la

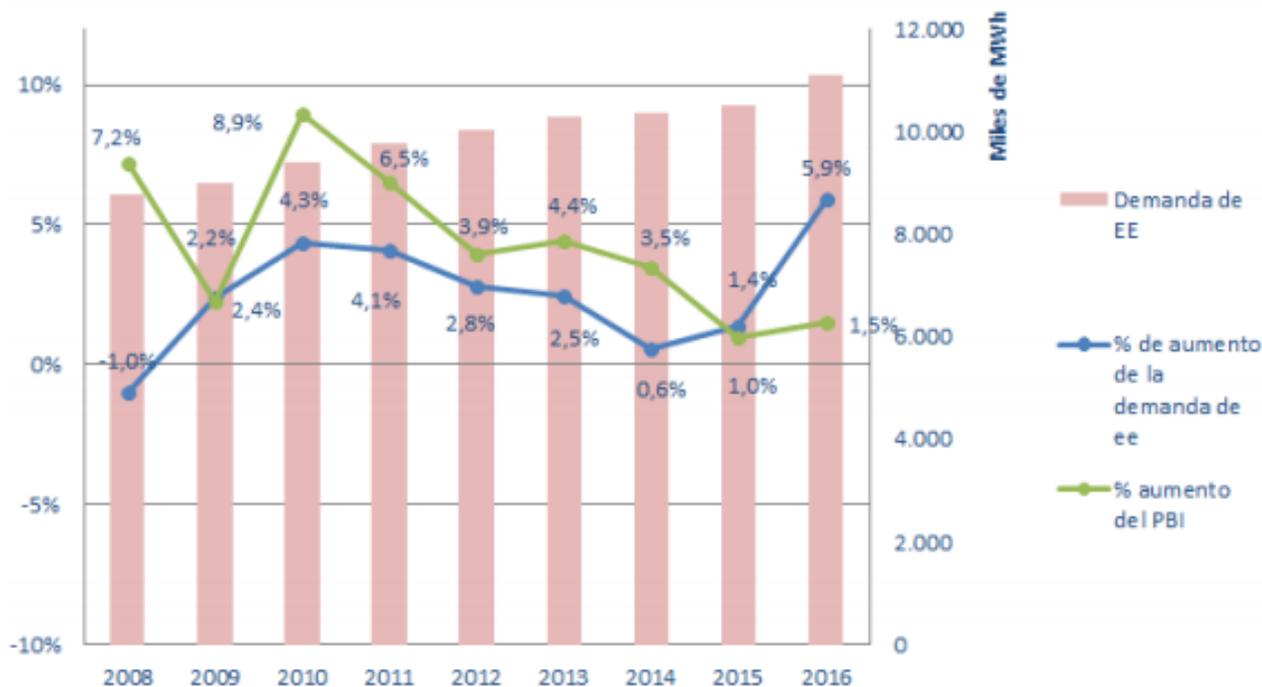


Figura 44 donde se ve el incremento de la demanda de energía eléctrica año a año, se puede observar que un cambio de alrededor del 50% de los hogares por Bomba de calor podría llegar a mitigar el aumento de la demanda que ocurre de un año a otro.

Tabla 33. Resultados del cambio de distintos porcentajes de los hogares por Bomba de calor y Calefones A.

	Bomba de calor		Calefón A	
	Ahorro EE de la demanda			
Se cambian	GWh/año	% disminución anual	GWh/año	% disminución anual
25%	159	1,3%	21	0,2%
50%	318	2,7%	43	0,4%
75%	477	4,0%	64	0,5%



Figura 44. Demanda de Energía Eléctrica y crecimiento del PIB en el periodo 2008 – 2016 [62].

En la Tabla 34 se pueden apreciar los resultados al cambiar por Gas Instantáneo y Gas con Almacenamiento los distintos porcentajes de hogares. Se puede observar que la utilización de equipos instantáneos implica un aumento menor del consumo debido a que estos equipos son más eficientes al no tener pérdidas en la acumulación. Luego, un cambio del 25% de los equipos a Gas Natural implicaría casi duplicar la cantidad de Gas Natural que se importa hoy en día mientras que solamente implicaría aumentar la cantidad de GLP consumido casi un 20%. Esto parecería razonable ya que el GLP tiene alcance Nacional mientras que el Gas Natural es más limitado llegando solamente a ciertos barrios. En cuanto a la disminución en el consumo de energía eléctrica se puede ver que un cambio de un 75% podría llegar a generar una disminución del 8% del consumo a nivel de demanda que se traduce en casi un 9% de la generación considerando que las pérdidas de transmisión y distribución son de alrededor del 10%.

Tabla 34. Resultados del cambio de distintos porcentajes de los hogares por sistemas a Gas Instantáneo y con Almacenamiento.

	Gas Inst			Ahorro EE demanda
	Aumento	GN	GLP	

Se cambian	GWh/año	% incremento anual	millones m3	% incremento anual	k tons	GWh/año	% disminución anual
25%	254	87%	24	19%	3.485	302	2,5%
50%	508	175%	47	38%	6.970	603	5,1%
75%	762	262%	71	57%	10.454	905	7,6%
<b>Gas Alm</b>							
	<b>Aumento</b>	<b>GN</b>		<b>GLP</b>		<b>Ahorro EE demanda</b>	
Se cambian	GWh/año	% incremento anual	millones m3	% incremento anual	k tons	GWh/año	% disminución anual
25%	341	117%	32	26%	4.681	302	2,5%
50%	683	235%	63	51%	9.362	603	5,1%
75%	1.024	352%	95	77%	14.043	905	7,6%

En cuanto a las emisiones se puede apreciar en la Tabla 35 que incluso un cambio en el 75% de los equipos en el peor de los casos conllevaría un aumento de las emisiones menor al 5%. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las emisiones consideradas en la comparativa solo son originadas por el uso del combustible pero no consideran la logística, el envasado ni ningún otro proceso que genere gases de efecto invernadero. Por lo tanto el valor final una vez que se considere todo lo anterior será aún mayor.

Tabla 35. Resultados de las emisiones al realizar cambios de distintos porcentajes de los hogares por sistemas a Gas Instantáneo y con Almacenamiento.

	Gas Instantáneo				Gas con Almacenamiento			
	GN		GLP		GN		GLP	
Se cambian	ktons CO2	aumento	ktons CO2	aumento	ktons CO2	aumento	ktons CO2	aumento
25%	41	0,6%	48	0,6%	58	0,8%	67	0,9%
50%	82	1,1%	95	1,3%	116	1,6%	134	1,8%
75%	123	1,7%	143	1,9%	173	2,3%	201	2,7%

Por último se debe analizar la capacidad de envasado para el caso del GLP ya que el gasoducto Cruz del Sur que trae el Gas Natural de Argentina a Uruguay tiene una capacidad ociosa significativa (cuenta con una capacidad de 1,8 mil millones de m<sup>3</sup> por año y en el año 2016 se consumieron en todo Uruguay 27 millones de m<sup>3</sup>) y no presentaría una restricción a un posible aumento del consumo. Considerando que en el 2016 se consumieron 1.334 GWh de Energía proveniente de GLP y tomando el caso menos favorable donde todo el GLP se haya vendido en garrafas de 13 kg. Tomando en cuenta que el GLP presenta 13,71 kWh/kg, se concluye que la capacidad de envasado promedio necesaria es de 20 mil garrafas por día. Según, datos recabados en Uruguay se pueden envasar con los turnos existentes unas 50 mil garrafas por día y con algún turno adicional se puede llegar a 10 mil más fácilmente. De acuerdo a lo anterior podría llegar a abastecerse el envasado sin problema incluso en el peor caso donde se cambie un 75% de los equipos a equipos de gas con almacenamiento, que implicaría un aumento del 89% (38 mil garrafas por día). Cabe destacar que estas consideraciones se

realizan suponiendo un consumo constante a lo largo del año y esto no refleja la realidad ya que en invierno pueden haber picos de demanda por el uso para calefacción principalmente pero estos picos normalmente son unos 20 días al año [78].

La capacidad de producción de GLP se podría incrementar a mediano plazo con inversiones pero como se vio en la Tabla 17, alrededor del 30% del GLP es importado por lo cual debería importarse la gran mayoría del aumento de consumo. Según el Informe sobre la paridad de precios que realiza la URSEA, en Noviembre el precio de paridad de importación era 45% mayor al precio de venta. En Enero de 2018 el GLP aumento un 15% por lo cual suponiendo que el precio de paridad de importación se mantuvo, aun sería un 26% mayor al precio de venta. En el caso planteado donde aumente el consumo de GLP se deberá tener en cuenta que debido a que se deberá importar más cantidad y que el precio de importación es menor al de venta, podría llegar a ocurrir un aumento del precio de venta debido a que la participación de importado sería aun mayor presionando los precios finales al alza [79].

Por último se analiza el ahorro anual del conjunto de usuarios suponiendo los mismos porcentajes de cambios considerados anteriormente. En la Tabla 36 se encuentran los valores obtenidos al realizar la estimación solamente para las alternativas más atractivas económicamente para los usuarios, ya que estas serán más probablemente las que estos realizaran.

*Tabla 36. Ahorro anual del total de los usuarios en millones de USD para los 3 escenarios de porcentaje de cambio de tecnología (alternativas más atractivas económicamente para los usuarios).*

	<b>Ahorro anual del total de los usuarios (millones de USD)</b>			
<b>Se cambian</b>	<b>Bomba de calor Doble Hor.</b>	<b>Gas Inst. Gas Nat.</b>	<b>Gas Inst. GLP</b>	<b>Calefón A Doble Hor.</b>
<b>25%</b>	44	41	38	22
<b>50%</b>	87	83	76	44
<b>75%</b>	131	124	114	66

ExRt: 29 \$/USD

Luego en la Tabla 37 se puede apreciar una Tabla análoga a la anterior pero para el caso de un calefón eficiencia A con un CSA. Se puede apreciar como el ahorro anual considerando la tarifa doble horario es mayor que el obtenido con una bomba de calor pero como se vio anteriormente los indicadores económicos no son mejores debido a que el CSA presenta un mayor costo de inversión. Para lograr que el CSA obtenga los mismos valores de Periodo de Repago, Tasa Interna de Retorno y Valor presente neto que la bomba de calor, la inversión del sistema incluyendo la instalación debe costar alrededor de 32 mil pesos. El incentivo del plan solar hace que el costo del CSA instalado sea significativamente más competitivo con la bomba de calor.

*Tabla 37. Ahorro anual del total de los usuarios en millones de USD para los escenarios de calefón Eficiencia A con CSA.*

	<b>Ahorro anual del total de los usuarios (millones de USD)</b>	
<b>Se cambian</b>	<b>Calefón A con CSA Res. Simp.</b>	<b>Calefón A con CSA Doble Hor.</b>

<b>25%</b>	44	50
<b>50%</b>	87	100
<b>75%</b>	131	150

ExRt: 29 \$/USD

Este ahorro por parte de los usuarios implicaría una menor facturación de las empresas que proveen los energéticos por lo cual se debe tener en cuenta que una migración además de beneficiar al usuario en el costo anual que paga impactara positiva o negativamente en la facturación de UTE, Montevideo Gas, ANCAP y distribuidores.

## 8. CONCLUSIÓN Y POSIBLES DIRECCIONES DE FUTURAS INVESTIGACIONES

Uruguay es un país particular en el mundo debido a que realiza el calentamiento de agua casi en su totalidad (90%) con equipos eléctricos de almacenamiento. Esto podría llegar a ser una ventaja en el caso de que se pueda manejar la demanda ya que esto representa un almacenamiento energético considerable. Este factor es aún más ventajoso cuando se tiene un caso como Uruguay donde existe instalada mucha generación renovable y donde actualmente se generan excedentes. El plan piloto de UTE de Termotanques Inteligentes parecería ir en esta dirección ya que los usuarios permitirían a UTE manejar el momento del consumo del termotanque y por lo tanto el organismo puede utilizar estos consumos para moderar la demanda, disminuyéndola en picos de potencia altos y aumentándola cuando existen excedentes. Al calentar el agua se está almacenando esa energía eléctrica excedente que de otra forma debía exportarse o evitar generarse además de lograr disminuir el pico de consumo tendiéndose a lo que se denomina como gestión de la demanda.

De los resultados del trabajo se puede concluir que desde el punto de vista de consumo energético las alternativas con CSA son las que presentan un menor consumo energético pero cuando se observan los indicadores económicos se puede ver que estos sistemas ya no son tan atractivos debido principalmente a su alto costo de inversión. Luego le siguen la bomba de calor y los sistemas a gas instantáneos donde su ventaja radica en si el hogar presenta un bajo consumo o no. Los sistemas a gas instantáneos presentan los mejores valores tanto energéticos como económicos para consumos más pequeños ya que al no almacenar no cuentan con estas pérdidas. En cambio, al aumentar el consumo de agua las bombas de calor se presentan como una opción mejor debido a que presentan una mejor eficiencia y más aún cuando se utiliza una tarifa doble horario. Se destaca que un Calefón eficiencia A con una tarifa doble horario sería una opción de muy bajo costo de inversión que puede presentar ahorros considerables. Por último, se debe mencionar que la ventaja que si presentan únicamente los CSA es que el costo de inversión es más fácil de conocer que el costo de los energéticos en el tiempo por lo cual una vez que se compra el equipo el costo de operación normal es fijo e igual a 0 ya que el sol no presenta un costo y en cambio la energía eléctrica y el gas si van a variar sus precios en el tiempo y no pueden calcularse de una forma certera. Se puede observar que un cambio de alrededor del 50% de los hogares por Bomba de calor podría llegar a mitigar el aumento de la demanda que ocurre de un año a otro. Luego, un cambio del 25% de los equipos a Gas Natural implicaría casi duplicar la cantidad de Gas Natural que se importa hoy en día mientras que solamente implicaría aumentar la cantidad de GLP consumido casi un 20%. En cuanto a las emisiones incluso un cambio en el 75% de los equipos en el peor de los casos conllevaría un aumento de las emisiones menor al 5%. Ni la capacidad de envasado para el caso del GLP ni el gasoducto Cruz del Sur que trae el Gas Natural de Argentina a Uruguay presentarían una restricción a un posible aumento del consumo.

La utilización de un timer en el uso de una tarifa eléctrica doble horario residencial donde los equipos no funcionen en las horas pico conllevaría un ahorro significativamente mayor debido a que en estas horas la electricidad tiene un costo 2,5 veces mayor y esto se traduce en una disminución de alrededor de un 25% respecto al uso de tarifa doble horario pero sin el uso de timer. La desventaja que esto presenta es que durante estas horas si se realizan consumos de agua caliente el equipo no podrá

reponerla y se podría llegar a tener una pérdida del confort si el equipo se quedara sin agua a la temperatura requerida como se ha reportado para el perfil generado donde ocurre 68 de los 365 días del año.

Debido a que el ahorro de un nuevo sistema viene dado por los gastos evitados de energía en el consumo de agua caliente por tener un sistema más eficiente es que los sistemas más eficientes son más apropiados para hogares con alto consumo de agua ya que proveen menores costos a lo largo de todo su ciclo de vida [32]. De acuerdo a la encuesta continua de hogares llevada a cabo por el INE, el ingreso medio de los hogares para Montevideo en Noviembre de 2017 fue estimado en 57.394 \$/mes [54]. Se puede observar que una inversión en una bomba de calor o en un CSA representaría más de un 65% del ingreso medio mensual de un hogar por lo cual lo hace una inversión bastante inaccesible. Si a esto se agrega que según los datos del censo 2011 el 55% de las viviendas de Montevideo están ocupadas por sus propietarios [53], el resto de las viviendas no verían una motivación en realizar ninguna inversión en cambiar el sistema existente o comprar el más eficiente ya que no son los mismo los que van a incurrir en los gastos de los energéticos o van a tener que comparar un equipo que luego va a quedar en la vivienda una vez se termine el contrato de alquiler.

En este estudio no se consideró que al cambiar por un equipo a gas se podría modificar la tarifa eléctrica del hogar a una Básica Residencial que presenta costos significativamente menores a las otras dos tarifas residenciales. Esto es siempre y cuando la vivienda tenga una potencia contratada de máximo 3,7 kW y los consumos mensuales sean menores a 230 kW. En esta última opción también debería tenerse en cuenta que en caso de no tener la conexión al servicio de gas natural se debe abonar 276 dólares lo cual se debe considerar como un extra costo adicional a la elección del equipo.

Lograr obtener información de buena calidad sobre el consumo de agua caliente sanitaria de un hogar es necesaria para diseñar efectivamente y al mismo tiempo eficiente un sistema de calentamiento apropiado además de ser muy importante si se buscan resultados más ambiciosos como planificación de calefacción urbana (district-energy planning), utilización de sistemas combinados de acondicionamiento térmico y calentamiento de agua, diseño de construcciones que sean energía cero y aplicaciones de redes inteligentes (Smart grids) [80]. Debido a esto es que se debe investigar si perfiles de consumo reales pueden llegar a tener una influencia significativa en el análisis de performance de los sistemas ya que los datos generados en base a demanda promedio representan información limitada debido a la complejidad de los perfiles de consumo de ACS. Además, se debe obtener un mejor entendimiento de los factores que influyen en la demanda de ACS, como pueden ser el número de eventos, la duración, los flujos y por consiguiente los volúmenes demandados. Es también importante poder entender en la realidad cuando se dan estos eventos a lo largo del día para diferentes hogares, usuarios y condiciones climáticas. Se ha encontrado que los factores socio económicos tienen alta influencia en el consumo promedio de ACS por lo cual es un factor que se debería también agregar a los estudios. Otro factor a tener en cuenta que ha sido extensamente estudiado y se le denomina “Efecto rebote” es que en un hogar luego de un cambio de tecnología a un sistema más eficiente posiblemente pasen a aumentar su consumo ACS, disminuyendo por tanto el ahorro económico proyectado a cambio de una mejora en el confort. Esto es un escenario factible debido a que en la actualidad los costos de generación ACS son

significativos y muchas familias reducen su confort para evitar altos gastos y además muchas veces se tienen calefones eléctricos de baja capacidad que generan una reducción del confort si la cantidad de integrantes de la familia no es acorde a la capacidad del equipo.

También sería de importancia para poder realizar informes de mejor calidad el relevamiento y cuantificación del parque de calentadores de agua que existen actualmente y de la temperatura del agua proveniente de la red. Un mejor conocimiento de lo que existe instalado en el país ayudara a lograr definir un Escenario Base más cercano a la realidad y poder así obtener resultados más exactos en cuanto a ahorros y por lo tanto indicadores económicos. Valores de temperatura del agua proveniente de la red ayudaran también a mejorar las estimaciones de consumo de energía y para ello se requieren datos provenientes de estudios de campo y posteriormente con estos datos se debería realizar un mejor modelo que tenga en cuenta las distintas condiciones climáticas para poder obtener mejores estimaciones para cada lugar del país.

Por ultimo cabe destacar que como se comentó anteriormente se estima que más del 80% de las ventas son debido a reemplazos de los equipos y dentro de estos más del 60% se debe a que la unidad ha fallado. Por lo tanto es importante informar a consumidores, sanitarios y vendedores, que las opciones más eficientes se encuentren disponibles ya que pocos consumidores tienen el tiempo o el interés de analizar las opciones disponibles. Además, esto hace que la decisión se vea fuertemente influenciada por lo que el sanitario o el vendedor ofrecen.

## 9. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Características del sector residencial, datos 2013. Planificación, Estadística y Balance. Dirección Nacional de Energía. Ministerio de Industria, Energía y Minería.
- [2] Informe del Sector Residencial. Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear. Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2008
- [3] Comparison of Advanced Residential Water Heating Technologies in the United States. Jeff Maguire, Xia Fang and Eric Wilson. National Renewable Energy Laboratory. 2013. Disponible en: [https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building\\_america/comparison\\_water\\_heating\\_tech.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building_america/comparison_water_heating_tech.pdf)
- [4] Energy Efficiency Trends for households in the EU. Bruno Lapillonne, Karine Pollier, Nehir Samci. Enerdata. 2015
- [5] Water Heating. Energy Technology Systems Analysis Programme. International Energy Agency. 2012 Disponible en: [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/R03%20Water%20Heating%20FINAL\\_GSOK.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/R03%20Water%20Heating%20FINAL_GSOK.pdf)
- [6] Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro. Natália Sens Fedrigo, Guilherme Gonçalves, Paulo Figueiredo Lucas. Universidade Federal de Santa Catarina. 2009
- [7] Consumo De Energía A Nivel Residencial En Chile Y Análisis De Eficiencia Energética En Calefacción. Nathaly Patricia Romero Ramos. 2011
- [8] Aquecimento De Água No Setor Residencial. Patrícia Abdala Raimo. 2007
- [9] Guide to Building Energy Efficient Homes. Capítulo 9. Robert L. Fehr. University of Kentucky. 2009
- [10] Eficiencia en el calentamiento de agua Consumos pasivos en sistemas convencionales y solares híbridos. Leila Iannelli y Roberto Prieto. Enargas. 2016
- [11] Consejos Útiles - Hogar - Calentadores de Agua. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Disponible en: <http://www.miem.gub.uy/-/consejos-utiles-hogar-calentadores-de-agua>
- [12] Residential water heaters in Brisbane, Australia: Thinking beyond technology selection to enhance energy efficiency and level of service. Abel S. Vieira, Cara D. Beal, Rodney A. Stewart. Energy and Buildings 82 (2014) 222–236
- [13] Comparison of advanced Residential Water Heating Technologies in the United States. Jeff Maguire, Xia Fang and Eric Wilson. National Renewable Energy Laboratory. 2013
- [14] Demanda, Consumo e Custo das alternativas ao chuveiro elétrico: O exemplo do Estado de São Paulo. Roberto Ramos Matajs. Universidade de Sao Paulo. 1997
- [15] Aquecimento De Água No Setor Residencial. Patricia Abdala Raimo. Universidade de São Paulo. 2007
- [16] Energy Star® Water Heater Update. ACEEE Hot Water Forum. 2017. Disponible en: [http://aceee.org/sites/default/files/pdf/conferences/hwf/2017/Ryan\\_Session1D\\_HWF17\\_2.27.17.pdf](http://aceee.org/sites/default/files/pdf/conferences/hwf/2017/Ryan_Session1D_HWF17_2.27.17.pdf)

- [17] El perfil de los hogares uruguayos. 2016. Disponible en: [http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/novedades/-/asset\\_publisher/JXsLLcWfNTX/content/el-perfil-de-los-hogares-uruguayos](http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/novedades/-/asset_publisher/JXsLLcWfNTX/content/el-perfil-de-los-hogares-uruguayos)
- [18] Análisis del consumo energético del sector residencial en España. IDEA, Secretaría General Departamento de Planificación y Estudios. 2011. Disponible en: [http://www.epsa.upv.es/redentorno/pdf/1516\\_document.pdf](http://www.epsa.upv.es/redentorno/pdf/1516_document.pdf)
- [19] Solar Heating and Cooling for Residential Applications Technology Brief. IEA-ETSAP and IRENA Technology Brief R12. 2015.
- [20] Balance energético nacional. Disponible en: [http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/planificacion-y-balance/publicaciones/-/asset\\_publisher/CauNjzzq2yWA/content/balance-energetico-nacion-1?redirect=http%3A%2F%2Fwww.dne.gub.uy%2Fpublicaciones-y-estadisticas%2Fplanificacion-y-balance%2Fpublicaciones%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_CauNjzzq2yWA%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-1%26p\\_p\\_col\\_count%3D1](http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/planificacion-y-balance/publicaciones/-/asset_publisher/CauNjzzq2yWA/content/balance-energetico-nacion-1?redirect=http%3A%2F%2Fwww.dne.gub.uy%2Fpublicaciones-y-estadisticas%2Fplanificacion-y-balance%2Fpublicaciones%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_CauNjzzq2yWA%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1)
- [21] Mapas energéticos. Dirección Nacional de Energía. Planificación, estadística y balance. MIEM. 2017. Disponible en: <http://www.dne.gub.uy/documents/15386/7730255/Informe%20actualizaci%C3%B3n%20abril%202017.pdf>
- [22] Norma UNIT 1157:2010 “Eficiencia energética. Calentadores de agua eléctricos de acumulación de uso doméstico. Especificaciones y etiquetado”. Disponible en: <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/26296/UNIT+1157+2010+-Eficiencia+Energetica.+Calentadores+de+agua+electricos+de+acumulacion.+Especificaciones+y+etiquetado.pdf/1c8426e1-273f-4029-a358-bd99240b49f2?version=1.0>
- [23] Eficiencia Energética. Texto Compilado de Normativas de URSEA. Disponible en: [http://www.ursea.gub.uy/wps/wcm/connect/a7f55d0041cad0dab2c2f22c8d0a962d/TCN7+URSEA+Eficiencia+Energetica+2017+01.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT\\_TO=url&CACHEID=a7f55d0041cad0dab2c2f22c8d0a962d](http://www.ursea.gub.uy/wps/wcm/connect/a7f55d0041cad0dab2c2f22c8d0a962d/TCN7+URSEA+Eficiencia+Energetica+2017+01.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=a7f55d0041cad0dab2c2f22c8d0a962d)
- [24] Comparing domestic water heating technologies. Chantelle M. Leidl, W. David Lubitz. Technology in Society 31, 244–256. 2009.
- [25] Energy Star Water heater market profile. U.S. Department of Energy. 2010. Disponible en: [https://www.energystar.gov/ia/partners/prod\\_development/new\\_specs/downloads/water\\_heaters/Water\\_Heater\\_Market\\_Profile\\_2010.pdf](https://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/new_specs/downloads/water_heaters/Water_Heater_Market_Profile_2010.pdf)
- [26] Final energy consumption by sector and fuel. European Environmental Agency. 2014. disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>
- [27] Energy consumption estimates by sector. US Energy Information Administration. 2017. Disponible en: <https://www.eia.gov/consumption/>

- [28] A Parametric Analysis of Residential Water Heaters. Jeffrey Brad Maguire. University of Colorado. 2012. Disponible en: [http://scholar.colorado.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1033&context=mcen\\_gradetds](http://scholar.colorado.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1033&context=mcen_gradetds)
- [29] Development of standardized domestic hot water event schedules for residential buildings. Robert Hendron & Jay Burch. National Renewable Energy Laboratory. 2008
- [30] Residential water heaters in Brisbane, Australia: Thinking beyond technology selection to enhance energy efficiency and level of service. Abel S. Vieira, Cara D. Beal, Rodney A. Stewart. Energy and Buildings 82 (2014) 222–236.
- [31] Pliego Tarifario UTE. 2017. Disponible en: <http://portal.ute.com.uy/sites/default/files/documents/files/Pliego%20Tarifario%20enero%202017.pdf>
- [32] An energy and cost comparison of residential water heating technologies. Christopher M. Keinath, Srinivas Garimella. Energy 128 (2017) 626-633.
- [33] Domestic Water Heating and Water Heater Energy Consumption in Canada. C. Aguilar, D.J. White & David L. Ryan. 2005. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.477.1453&rep=rep1&type=pdf>
- [34] Hot water service. Australian Government. Disponible en: <http://www.yourhome.gov.au/energy/hot-water-service>
- [35] What goes up: Recent trends in Mexican residential energy use. Jorge Alberto Rosas-Flores & David Morillón Gálvez. 2010. Energy, Volume 35, 2596-2602.
- [36] Solar water heating potential in South Africa in dynamic energy market conditions. Georgi Donev, Wilfried G.J.H.M.van Sarka, Kornelis Bloka & Ognjan Dintchevb. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Volume 16, 3002-3013.
- [37] Balance Energético Nacional 2016. Ministerio de Industria Energía y Minería. Disponible en: <http://www.ben.miem.gub.uy/balance.html>
- [38] Reportes UTE en cifras. Disponible en: <https://portal.ute.com.uy/institucional-informaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-y-financiera/ute-en-cifras>
- [39] El supergas. ACODIKE. Disponible en: <https://www.acodike.com.uy/el-super-gas/>
- [40] Supegas. RIOGAS. Disponible en: <http://www.riogas.com.uy/supergas>
- [41] ¿Qué es el gas natural? Montevideo Gas. Disponible en: [http://www.montevideogas.com.uy/uc\\_9\\_1.html](http://www.montevideogas.com.uy/uc_9_1.html)
- [42] ¿Qué es el gas natural? Conecta. Disponible en: <http://www.conecta.com.uy/que-es-el-gas-natural>
- [43] Tarifas. Montevideo Gas. Disponible en: [http://www.montevideogas.com.uy/uc\\_43\\_1.html](http://www.montevideogas.com.uy/uc_43_1.html)
- [44] Tarifas. Conecta. Disponible en: <http://www.conecta.com.uy/tarifas>

- [45] Plan Recambio de Termotanques. UTE. Disponible en: <https://www.solucionesenergeticas.com.uy/soluciones/plan-recambio-termotanques>
- [46] Plan termotanques inteligentes. UTE. Disponible en: <https://www.solucionesenergeticas.com.uy/soluciones/plan-termo>
- [47] Plan Solar. DNE, UTE, BSE, BHU y la URSEA. Disponible en: <https://www.solucionesenergeticas.com.uy/soluciones/plan-solar>
- [48] New Zealand's Consumption. Petroleum Exploration and Production Association of New Zeland. Disponible en: <http://www.energymix.co.nz/our-consumption/new-zealands-consumption/>
- [49] Energy savings under the E3 Programme. Energy Efficiency and Conservation Authority. Disponible en: <https://www.eeca.govt.nz/standards-ratings-and-labels/equipment-energy-efficiency-programme/energy-savings-achieved-under-e3/>
- [50] 2016 Australian Energy Statistics. Department of Industry, Innovation and science. Disponible en: <https://www.industry.gov.au/Office-of-the-Chief-Economist/Publications/Documents/aes/2016-australian-energy-statistics.pdf>
- [51] Energy Use In The Australian Residential Sector 1986 – 2020. Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts. Disponible en: <https://industry.gov.au/Energy/Energy-information/Documents/energyuseaustralianresidentialsector19862020part1.pdf>
- [52] Tool for Generating Realistic Residential Hot Water Event Schedules. Bob Hendron & Jay Burch. National Renewable Energy Laboratory. 2010
- [53] Censos 2011. Instituto Nacional de Estadística. Disponible en: <http://www.ine.gub.uy/web/guest/censos-2011>
- [54] Encuesta Continua de Hogares. Octubre 2017. Instituto Nacional de Estadística. Disponible en: <http://www.ine.gub.uy/documents/10181/30869/ECH+Ingresos+Octubre+2017/11b7a834-0f37-4f2a-bce4-797ac72d76e1>
- [55] Especificaciones Técnicas Uruguayas De Instalaciones Solares Térmicas. Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2014. Disponible en: [http://www.energiasolar.gub.uy/images/etus\\_201403.pdf](http://www.energiasolar.gub.uy/images/etus_201403.pdf)
- [56] Apuntes del curso de Fundamentos de Energía Solar. Instituto de Física. UDELAR. 2016
- [57] Thermal Conductivity of common Materials and Gases. The Engineering Toolbox. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
- [58] Emissivity Coefficients of some common Materials. The Engineering Toolbox. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
- [59] Wind Energy Handbook. Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe & Ervin Bossanyi. Wiley.
- [60] A review of domestic heat pumps. Staffell, I., Brett, D., Brandon, N. & Hawkes, A. 2012. Energy & Environmental Science 5, [11], 9291-9306.

- [61] Apuntes del curso de Eficiencia Energética. Instituto de Ingeniería Eléctrica. UDELAR. 2017
- [62] Informe anual 2016. Administración del Mercado Eléctrico (ADME). Disponible en: <http://latorre.adme.com.uy/mmee/pdf/informes/anual/InformeAnual2016.pdf>
- [63] Decreto 165/12. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Disponible en: <http://www.dne.gub.uy/documents/112315/3488076/Decreto%20165%20012.pdf>
- [64] Decreto 430/09. IMPO. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/430-2009>
- [65] Entrevista a Pedro Tornoni. Encargado de prueba de calefones para el etiquetado. LATU.
- [66] Measurement of Domestic Hot Water Consumption in Dwellings. Energy Saving Trust (2008). Disponible en: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/48188/3147-measure-domestic-hot-water-consump.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48188/3147-measure-domestic-hot-water-consump.pdf)
- [67] World: Energy and Heat 2015. International Energy Agency. Disponible en: <https://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?year=2015&country=WORLD&product=ElectricityandHeat>
- [68] Apuntes del Curso Solar Energy dictado por la Universidad Delf (Países Bajos) disponible en la plataforma edx.org
- [69] Review of energy efficiency and system performance of residential heat pump water heaters. H. Willem, Y. Lin, A. Lekov. Energy and Buildings, 143, 2017, 191–201.
- [70] A review on Heat Pumps implementation in Lithuania in compliance with the National Energy Strategy and EU policy. Vygandas Gaigalis, Romualdas Skema, Kazys Marcinauskas, Irena Korsakiene. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 2016, 841–858.
- [71] A review of heat pump water heating systems. Arif Hepbasli, Yildiz Kalinci. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2009, 1211–1229
- [72] DHW Event Schedule Generator, Building America Analysis Spreadsheets. U.S. Department of Energy. Disponible en: <https://energy.gov/eere/buildings/building-america-analysis-spreadsheets>
- [73] Paramétrica de Fijación de Tarifas de Combustibles. ANCAP. Disponible en: <https://www.ancap.com.uy/innovaportal/v/4890/1/innova.front/parametrica-de-fijacion-de-tarifas-de-combustibles.html>
- [74] Comparativo de sistemas de calentamiento de agua sanitaria con y sin respaldo solar. Eliana Abalde, Camila Morales, María Neyeloff, 2016. Trabajo final del curso de Fundamentos de Energía Solar, dictado por el Instituto de Física.
- [75] Cálculo de eficiencia de calentadores solares de agua con respaldo eléctrico. Diego Piquerez. Trabajo final del curso de Fundamentos de Energía Solar, dictado por el Instituto de Física.
- [76] Summary of Emissions Factors for the Guidance for Voluntary Corporate Greenhouse Gas Reporting. Ministry for the Environment. New Zeland. Disponible en:

<https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/media/Climate%20Change/voluntary-ghg-reporting-summary-tables-emissions-factors-2015.pdf>

[77] Uruguay - Emisiones de CO<sub>2</sub>. Datos Macro. Disponible en: <https://www.datosmacro.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/uruguay>

[78] Entrevista con Gustavo Portas, Gerente Comercial de Acodike.

[79] Informe sobre precios de paridad de importación de productos derivados del petróleo correspondiente al mes de noviembre 2017. URSEA. Disponible en: [http://www.ursea.gub.uy/wps/wcm/connect/476ef50043d9755aa6f7ef6f44b58dc6/Informe+URSEA+PI+Noviembre+2017.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT\\_TO=url&CACHEID=476ef50043d9755aa6f7ef6f44b58dc6](http://www.ursea.gub.uy/wps/wcm/connect/476ef50043d9755aa6f7ef6f44b58dc6/Informe+URSEA+PI+Noviembre+2017.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=476ef50043d9755aa6f7ef6f44b58dc6)

[80] A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. E. Fuentes, L. Arce & J. Salom. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81. 2018. 1530–1547.

[81] Factores de conversión. Eficiencia Energética. MIEM. Disponible en: <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/30183/Factores+de+conversi%C3%B3n+y+emisi%C3%B3n+de+CO2.pdf/ffc1001a-746c-490f-a6e3-7016f42f36af>

[82] Material del curso de Transferencia de Calor y Masa I. Dictado por el Instituto de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. 2011

[83] Material del curso de Transferencia de Calor y Masa II. Dictado por el Instituto de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. 2012

[84] Domestic hot water consumption estimates for solar thermal system sizing. J. Evarts & L. Swan. 2012. Energy and Buildings 58, 58 – 65.

[85] Water Research Foundation Study Documents Water Conservation Potential and More Efficiency in Households. American Water Works Association . 2016. Disponible en: <http://www.waterrf.org/resources/Lists/ProjectPapers/Attachments/86/ProjectPaper-4309-1.pdf>

[86] BREDEM-12 Model description 2001 update. 2002. Department for Environment, Food and Rural Affairs. Disponible en: [https://www.iea.org/media/statistics/emanual/UK\\_BREDEM\\_model\\_description.pdf](https://www.iea.org/media/statistics/emanual/UK_BREDEM_model_description.pdf)

[87] Solar Heat Worldwide. Global Market Development Trends in 2016 & Detailed Market Figures 2015. W. Weiss, M. Spork-Dur & F. Mauthner. Edition 2017

[88] A Comparison of Approaches for the Analysis of Interaction Effects Between Latent Variables Using Partial Least Squares Path Modeling. Jörg Henseler & Wynne W. Chin. Structural Equation Modeling, 17:82–109, 2010. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.4743&rep=rep1&type=pdf>



## ANEXO I

# Simulación escenarios de calentamiento de agua

In [ ]:

```
import math
import random
import pandas as pd
import datetime as dt
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import style
import matplotlib.ticker as ticker
```

**Definición de las funciones que devuelven la hora del día en que ocurren los eventos en base a la distribución de probabilidad para:**

- canillas (**sink\_time**)
- duchas (**shower\_time**)
- lavado de platos (**DW\_time**) Cuando se las llama generan un número aleatorio que luego se ingresa en la distribución para obtener una hora del día.

In [ ]:

```
def shower_time():
    time = pd.DataFrame([
        [0, 0.0208940719144801, 0.0208940719144801],
        [1, 0.010689990281827, 0.0315840621963071],
        [2, 0.00485908649173955, 0.0364431486880467],
        [3, 0.00340136054421769, 0.0398445092322643],
        [4, 0.00485908649173955, 0.0447035957240039],
        [5, 0.0136054421768708, 0.0583090379008746],
        [6, 0.0515063168124393, 0.109815354713314],
        [7, 0.117589893100097, 0.227405247813411],
        [8, 0.116618075801749, 0.34402332361516],
        [9, 0.0947521865889213, 0.438775510204082],
        [10, 0.0743440233236152, 0.513119533527697],
        [11, 0.0597667638483965, 0.572886297376093],
        [12, 0.0471331389698737, 0.620019436345967],
        [13, 0.0340136054421769, 0.654033041788144],
        [14, 0.0291545189504373, 0.683187560738581],
        [15, 0.0252672497570457, 0.708454810495627],
        [16, 0.0262390670553936, 0.73469387755102],
        [17, 0.0301263362487852, 0.764820213799806],
        [18, 0.0388726919339164, 0.803692905733722],
        [19, 0.0422740524781341, 0.845966958211856],
        [20, 0.0422740524781341, 0.88824101068999],
        [21, 0.0417881438289602, 0.93002915451895],
        [22, 0.0408163265306122, 0.970845481049563],
        [23, 0.0291545189504373, 1]],
        columns=['Hour', 'Hourly Profile', 'Accumulated'])

a = random.random()
```

```
time['Dif'] = abs(time['Accumulated'] - a)

return time['Dif'].idxmin(axis=1)
```

In [ ]:

```
def sink_time():
    time = pd.DataFrame([
        [0, 0.0271954674220963, 0.0271954674220963],
        [1, 0.0141643059490085, 0.0413597733711048],
        [2, 0.00679886685552408, 0.0481586402266289],
        [3, 0.00509915014164306, 0.0532577903682719],
        [4, 0.00509915014164306, 0.058356940509915],
        [5, 0.00679886685552408, 0.0651558073654391],
        [6, 0.0181303116147309, 0.08328611898017],
        [7, 0.0424929178470255, 0.125779036827195],
        [8, 0.0623229461756374, 0.188101983002833],
        [9, 0.0657223796033994, 0.253824362606232],
        [10, 0.0617563739376771, 0.315580736543909],
        [11, 0.0543909348441926, 0.369971671388102],
        [12, 0.0498583569405099, 0.419830028328612],
        [13, 0.0487252124645892, 0.468555240793201],
        [14, 0.0453257790368272, 0.513881019830028],
        [15, 0.0413597733711048, 0.555240793201133],
        [16, 0.0430594900849858, 0.598300283286119],
        [17, 0.0481586402266289, 0.646458923512748],
        [18, 0.0651558073654391, 0.711614730878187],
        [19, 0.0747875354107649, 0.786402266288952],
        [20, 0.0691218130311615, 0.855524079320113],
        [21, 0.056657223796034, 0.912181303116147],
        [22, 0.0481586402266289, 0.960339943342776],
        [23, 0.0396600566572238, 1]],
        columns=['Hour', 'Hourly Profile', 'Accumulated'])

    a = random.random()
    time['Dif'] = abs(time['Accumulated'] - a)

    return time['Dif'].idxmin(axis=1)
```

In [ ]:

```
def DW_time():
    time = pd.DataFrame([
        [0, 0.030716724, 0.030716724],
        [1, 0.015358362, 0.046075086],
        [2, 0.006825939, 0.052901025],
        [3, 0.005119454, 0.058020479],
        [4, 0.003412969, 0.061433448],
        [5, 0.003412969, 0.064846417],
        [6, 0.010238908, 0.075085325],
        [7, 0.020477816, 0.095563141],
        [8, 0.030716724, 0.126279865],
        [9, 0.058020478, 0.184300343],
        [10, 0.064846416, 0.249146759],
        [11, 0.056313993, 0.305460752],
        [12, 0.04778157, 0.353242322],
        [13, 0.040955631, 0.394197953],
        [14, 0.046075085, 0.440273038],
        [15, 0.037542662, 0.4778157],
        [16, 0.035836177, 0.513651877],
```



```

df = pd.DataFrame(d)
df['Uso'] = 'Ducha'

return df.sort_values('Hora')

```

Para canillas el consumo por día se consideró del 28% del determinado para las duchas ya que en la planilla elaborada por el NREL estaba seteada en el 90% del consumo en duchas lo cual es muy elevado para Uruguay. Se limita el flujo entre 1 y 11 l/min. Los valores de duración y flujo de la distribución son los obtenidos de la planilla del NREL. Se generaran 5 eventos por día por persona.

In [ ]:

```

def sink(personas):
    # en mins
    avg_dur = 0.62
    stdev_dur = 0.67
    # en litros/min
    avg_flow = 4.32
    stdev_flow = 2.31

    d = []
    #  $0.28 * 5.68 * 8.14 / (0.62 * 4.32) = 4.8 = 5$ 
    while len(d) < 5 * personas:

        # Duracion
        dur = 0
        while dur < 0.01:
            dur = - avg_dur * math.log(random.random())

        # Flujo
        flu = 0
        while (flu < 1) | (flu > 11):
            flu = (avg_flow + stdev_flow * math.sin(2 * math.pi *
                                                    random.random())) *
                  math.sqrt(-2 * math.log(random.random()))

        d.append({'Hora': sink_time(), 'Duracion [min]': dur,
                  'Flujo [lts/min]': flu,
                  'Volumen [lts] tibia': dur * flu})

    df = pd.DataFrame(d)
    df['Uso'] = 'Pileta'

    return df.sort_values('Hora')

```

Para el lavado de platos el consumo por día es del 18% del determinado para las duchas de acuerdo a la planilla del NREL. Se limita el flujo entre 1 y 11 l/min. Los valores de duración y flujo de la distribución son los obtenidos de la planilla del NREL. El volumen total de un evento se limita en 10 lts. Se generaran 1 evento por día por persona.

In [ ]:

```

def DW(personas):
    # en mins
    avg_dur = 1.38      # 1.38 en Generator
    stdev_dur = 0.37   # 0.37 en Generator

```

```

# en litros/min
avg_flow = 5.26 # 5.26 en Generator
stdev_flow = 0.76 # 0.76 en Generator

d = []
# 0.18 * 5.68 * 8.14 / (1.38 * 5.26) = 1.14 = 1
while len(d) < personas:

    # Duracion
    dur = 0
    while dur < 0.01:
        dur = - avg_dur * math.log(random.random())

    # Flujo
    flu = 0
    while (flu < 1) | (flu > 11):
        flu = (avg_flow + stdev_flow * math.sin(2 * math.pi *
                                                random.random()) *
              math.sqrt(-2 * math.log(random.random())))

    d.append({'Hora': shower_time(), 'Duracion [min]': dur,
             'Flujo [lts/min]': flu,
             'Volumen [lts] caliente': dur * flu})

df = pd.DataFrame(d)
df['Uso'] = 'Platos'

return df.sort_values('Hora')

```

Se define la función **consumo\_dia** que con la cantidad de personas llama a las funciones que crean los eventos diarios para cada uno de los 3 usos y luego los combina en un unico dataframe que contiene todos los eventos que ocurrieron en un día.

In [ ]:

```

def consumo_dia(personas):
    dfsink = sink(personas)
    dfshower = shower(personas)
    dfDW = DW(personas)

    dftotal = pd.concat([dfsink, dfshower, dfDW])
    dftotal.sort_values('Hora')

    return dftotal

```

Se define la función **perfil\_anual** que genera el perfil para todo el año llamando a la función consumo\_dia 1 vez para cada día del año. Agrega la columna DOY (Day Of Year) y genera dos archivos csv:

- Eventos, donde aparecen todos los eventos día a día
- Horario, donde devuelve el consumo total hora a hora para cada día sumando todos los orígenes de consumo de agua

Se debe tener en cuenta que devuelve dos columnas en cada dataframe:

- Volumen [lts] tibia que es el agua que se consume a 38 grados para ducha y lavado de manos
- Volumen [lts] caliente que es el agua que se consume directo sobre los platos a 50-60

- volumen [lts] caliente que es el agua que se consume directo sobre los platos a 50-60 grados para remover grasa y facilitar el lavado. Esta función devuelve una lista con 2 dataframes, el primer item con todos los eventos diarios y el segundo con los consumos agrupados por hora.

In [ ]:

```
def perfil_anual(personas):

    # cantidad de agua total (fria +caliente)
    allevents = []
    agrupado = []
    for day in range(365):
        cons_dia = consumo_dia(personas)
        cons_dia['DOY'] = day + 1
        allevents.append(cons_dia)
        agrupado.append(cons_dia.groupby(['DOY', 'Hora'])
                        ['Volumen [lts] tibia', 'Volumen [lts] caliente'].
                        agg(sum).reset_index(level=['DOY', 'Hora']))

    eventos = pd.concat(allevvents)
    consumo_horario = pd.concat(agrupado)

    hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
    eventos.to_csv(r'generated_csvs\Eventos ' + hoy + ' ' +
                  str(personas) + 'pers.csv')
    consumo_horario.to_csv(r'generated_csvs\Horario ' + hoy + ' ' +
                           str(personas) + 'pers.csv')

    return [eventos, consumo_horario]
```

## Definición de la función **\*\*colector\*\*** que calcula la temperatura del agua del tanque de almacenamiento en base a los parámetros del colector, la demanda de agua y los datos horarios a lo largo del año de:

- Temperatura ambiente
- Irradiación en un plano de 45 grados
- Velocidad del viento a 10 metros de altura La velocidad del viento es llevada a 3 m de altura ya que esta es la altura normal del techo de una casa con la ecuación del Wind Energy Handbook La función realiza para cada hora el cálculo de:
- Qutil a partir de los parámetros característicos tomadas de las Especificaciones Técnicas Uruguayas de Instalaciones Solares Térmicas y la Irradiación en el plano de 45 grados
- Pérdidas en la tubería desde el colector hasta el sistema de respaldo a partir de los parámetros característicos tomadas de las Especificaciones Técnicas Uruguayas de Instalaciones Solares Térmicas
- Temperatura del agua que va al sistema de respaldo
- Volumen de agua que se retira del tanque del colector
- Pérdidas en el tanque del colector (a través del cuerpo del cilindro y de las tapas)
- Temperatura del agua dentro del tanque del colector

Las pérdidas se calculan de forma iterativa al suponer una temperatura de pared ( $T_p$ ) para obtener el  $h$  de radiación y con este se calcula el  $Q$  de pérdidas para luego volver a calcular el  $T_p$ . El  $h$  de convección forzada se calcula en base a la velocidad del viento de acuerdo a la ecuación de Adams. Para las pérdidas en la tubería luego se obtiene el delta temperatura que estas pérdidas implican de forma de poder proveer el agua a la temperatura de seteo del sistema de respaldo.

In [ ]:

```
def colector(base):

    Tseteo = 60

    # TK almacenamiento
    capTK = 150      # litros
    emis = 0.075    # acero inox pulido
    Rext = 0.585/2 - 0.05
    espaisl = 0.05
    kaisl = 0.04    # lana de vidrio y PUF
    Raisl = Rext + espaisl
    largo = 0.981   # del cilindro
    Aext = 2 * math.pi * Raisl * largo # Aext del cilindro del tanque

    # Colector
    n0 = 0.7
    FRUL = 2
    A = 2.33        # Aperture Area

    # canos a sistema de respaldo
    Rext_ca = 0.0213 / 2 # canos usados
    espaisl_ca = 0.024  # 5cm de espesor
    Raisl_ca = Rext_ca + espaisl_ca
    emis_ca = 0.93
    kaisl_ca = 0.03

    base['Ttk'] = 0
    base['Qu'] = 0
    base['lts salen TK'] = 0
    base['Temp salida a respaldo'] = 0

    cols = base.columns.tolist()

    cal = cols.index('Total lts caliente')
    TAM = cols.index('TAM')
    Tmains = cols.index('Tmains')
    Vviento = cols.index('VVI10')
    GTI45 = cols.index('GTI45')

    Ttk = cols.index('Ttk')
    Qu = cols.index('Qu')
    Vsale = cols.index('lts salen TK')
    Tsale = cols.index('Temp salida a respaldo')

    # z para ajustar vel del viento de 10 a 3 m de altura, para ciudades es
0.7
    z = 0.7

    base.iloc[0, Ttk] = 60 # base.iloc[0, Tmains]

    for i in range(1, len(base)):
        tm = base.iloc[i - 1, Ttk]
        ta = base.iloc[i, TAM]
        G = base.iloc[i, GTI45]
        Qutil = A * (G * n0 - FRUL * (tm - ta))
        if Qutil > 0:
            base.iloc[i, Qu] = Qutil
        else:
```

```

else:
    base.iloc[i, Qu] = 0

# Perdidas en la caneria
Tp = 50
Tp1 = 20
while True:
    # z para ajustar vel del viento de 10 m a 3 m de altura
    hc = (5.7 + 3.8 * (math.log(3 / z) / math.log(10 / z)) *
          base.iloc[i, Vviento])
    hr = (emis_ca * 5.67E-8 * (((Tp + 273) ** 4 - (ta + 273) ** 4)) /
          (Tp - ta))
    h = hr + hc
    # Qp/L de canos considero temp tk o 60 si es mayor Ttk
    Qpcan = (2 * math.pi * (min(tm, Tseteo) - ta) /
             (math.log(Raisl_ca / Rext_ca) / kaisl_ca + 1 / (h * Rai
l_ca)))

    Tp1 = Qpcan / (h * math.pi * 2 * Raisl_ca) + ta

    if int(Tp) == int(Tp1):
        break
    else:
        Tp = (Tp + Tp1) / 2

# 10 metros de canos, 1000 J / kJ, 4.182 kJ / kg C, 0.067 l/s (4 l/
min)
perdidas = Qpcan * 10 / 1000 / 4.182 / 0.067

# Temp a respaldo y volumen retirado del TK
tmains = base.iloc[i, Tmains]
if tm < (Tseteo + perdidas):
    base.iloc[i, Tsale] = tm - perdidas
    base.iloc[i, Vsale] = base.iloc[i, cal]
else:
    base.iloc[i, Tsale] = Tseteo
    base.iloc[i, Vsale] = (base.iloc[i, cal] *
                           (Tseteo + perdidas - tmains) / (tm - tmai
s))

# Perdidas en el cuerpo del TK
Tpc = 50
Tp1c = 20
while True:
    hc = (5.7 + 3.8 * (math.log(3 / z) / math.log(10 / z)) *
          base.iloc[i, Vviento])
    hr = (emis * 5.67E-8 * (((Tpc + 273) ** 4 - (ta + 273) ** 4)) /
          (Tpc - ta))
    h = hr + hc
    # Qp del cilindro
    Qpc = (2 * math.pi * largo * (tm - ta) /
           (math.log(Raisl / Rext) / kaisl + 1 / (h * Raisl)))

    Tp1c = Qpc / (h * Aext) + ta
    if int(Tpc) == int(Tp1c):
        break
    else:
        Tpc = (Tpc + Tp1c) / 2

# Perdidas en las tapas del TK
Tnt = 50

```

```

    Tplt = 20
    while True:
        hc = (5.7 + 3.8 * (math.log(3 / z) / math.log(10 / z)) *
              base.iloc[i, Vviento])
        hr = (emis * 5.67E-8 * ((Tpt + 273) ** 4 - (ta + 273) ** 4)) /
              (Tpt - ta)
        h = hr + hc
        # Qp de una tapa
        Qpt = math.pi * Raisl ** 2 * (tm - ta) / (espaisl / kaisl + 1 / h)

        Tplt = Qpt / (h * math.pi * Raisl ** 2) + ta
        if int(Tpt) == int(Tplt):
            break
        else:
            Tpt = (Tpt + Tplt) / 2

        Qp = Qpc + 2 * Qpt
        # Qu y Qp en Wh por lo que multiplico x 3600 y / 1000 para KJ
        base.iloc[i, Ttk] = (tm + (base.iloc[i, Qu] * 3.6 - Qp * 3.6 -
                                   base.iloc[i, Vsale] * 4.182 * (tm - tmair
        )) / (capTK * 4.182))

    return base

```

## Definición de la función **`gen_yeardata`** que genera el perfil de consumo de agua caliente demandada a 60 grados a lo largo del año.

Para esto se le debe especificar la cantidad de integrantes que hay en el hogar y con esta información llama a la función **`perfil_anual`**. Importa los datos del año meteorológico típico del Laboratorio de Energía Solar y se queda para cada día y hora del año con la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la irradiación en el plano de 45 grados. Estos valores son utilizados para calcular primero la temperatura del agua corriente de entrada en base a una función parametrizada en base a datos relevados por el NREL. Luego, calcula el total de litros a 60 grados requeridos por la demanda y llama a la función **`colector`** de forma de obtener los datos aportados por el CSA. Toda esta información es devuelta por la función en un dataframe y guardada en un archivo csv con el nombre Base. Por último, genera cuatro gráficas del:

- consumo diario de agua caliente a 60 grados a lo largo del año.
- consumo horario de agua caliente a 60 grados a lo largo de las horas de un día aleatorio.
- eficiencia de la bomba de calor a lo largo del año.
- eficiencia del CSA a lo largo del año.

In [ ]:

```

def gen_yeardata(personas=0, graphs=True):
    if personas == 0:
        personas = int(input('Ingrese el numero de personas en el hogar: '
    ))

    # imports hourly data
    cols = ['DOY', 'MES', 'día', 'Hora', 'IDT', 'GHI', 'DNI', 'GTI20',
            'GTI35', 'GTI45', 'GTI60', 'GTI90', 'TAM', 'HRE', 'PAM',
            'VVI10', 'DVI10', 'VVI20', 'DVI20', 'CZ', 'AS', 'GS']

```

```

data = pd.read_csv(r'data\AMIUes_v2-4_MVD_horario.csv')
data.columns = cols

dclim = data.loc[:, ['DOY', 'MES', 'Hora', 'GTI45', 'TAM', 'VVI10']]

# promedio de temp amb mensual
Temps = data.groupby(by=['MES'])['TAM'].agg(np.mean).reset_index()
# se entra con Temps.iloc[mes-1,1]

# (°F - 32) x 5/9 = °C
# (°C x 9/5) + 32 = °F
# Temp promedio anual
Tav = (Temps['TAM'].mean()) * 9 / 5 + 32
ratio = 0.4 + 0.01 * (Tav - 44)

# Delta Tmax
DTmax = ((Temps['TAM'].max()) * 9 / 5 + 32 -
          (Temps['TAM'].min()) * 9 / 5 + 32) / 2

lag = 35 - (Tav - 44)
# Temp de agua de entrada
dclim['Tmains'] = ((Tav + 6 + ratio * DTmax / 2 *
                   np.sin((0.986 * (dclim['DOY'] - 15 - lag) + 90) *
                           math.pi / 180) - 32) * 5 / 9)

consumos = perfil_anual(personas)

yeardata = pd.merge(dclim, consumos[1], on=['DOY', 'Hora'], how='left')
yeardata.fillna(0, inplace=True)

# Temps en Celsius xq se restan
perdidas = 2 # perdidas en tuberia desde calentador a uso
Tuso = 38
Tsal = 60 # Temp de seteo del calentador
Tcal = Tsal - perdidas

yeardata['Total lts caliente'] = (yeardata['Volumen [lts] caliente'] +
                                 (yeardata['Volumen [lts] tibia'] *
                                  (Tuso - yeardata['Tmains']) /
                                  (Tcal - yeardata['Tmains'])))

# Agrega informacion del colector solar
yeardata = colector(yeardata)

hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
yeardata.to_csv(r'generated_csvs\Base ' + hoy + ' ' + str(personas) +
               'pers.csv')

anual = yeardata.groupby(['DOY'])['Total lts
caliente'].sum().reset_index()

if graphs:
    style.use('fivethirtyeight')

    plt.figure()
    ax = plt.subplot(1, 1, 1)
    plt.bar(anual['DOY'], anual['Total lts caliente'], linewidth=10)
    plt.xlabel('día del año', fontsize=24)
    plt.yticks(fontsize=20)
    x = [i for i in range(15, 366, 15)]
    plt.xticks(x)

```

```

x.insert(0, 1)
plt.xticks(x, fontsize=20)
plt.ylabel('Consumo de agua caliente lts/día', fontsize=24)
plt.grid(False, axis='x')
ax.set_xlim(xmin=0)

plt.figure()
ax = plt.subplot(1, 1, 1)
d = random.randint(1, 365)
day = yeardata[yeardata['DOY'] == d]
x2 = day['Hora'].values.tolist()
plt.bar(day['Hora'].values.tolist(), day['Total lts caliente'].
        values.tolist())
fec = dt.date(2018, 1, 1) + dt.timedelta(d - 1)
tit = 'Perfil del día N ' + str(d) + ' (' + fec.strftime("%d-%b") +
')'

plt.title(tit, fontsize=28)
plt.yticks(fontsize=20)
plt.xticks(x2, fontsize=20)
plt.xlabel('Hora', fontsize=24)
plt.ylabel('Consumo de agua caliente lts/hora', fontsize=24)
plt.grid(False, axis='x')
label = ("Total de litros\nconsumidos en el día:\n" +
        str(round(day['Total lts caliente'].sum(), 0)))
ax.text(2, day['Total lts caliente'].max() * 0.9, label, ha='center'
,
        va='bottom', fontsize=18, weight='bold')
ax.set_xlim(xmin=0)

plt.figure()
yeardata['COP'] = (6.81 - 0.121 * (60 - yeardata['TAM']) + 0.00063 *
        (60 - yeardata['TAM']) * (60 - yeardata['TAM']))
yeardata['COP'].plot()
plt.ylabel('COP', fontsize=24)
plt.xlabel('Hora del año', fontsize=24)
plt.xticks(fontsize=20)
plt.yticks(fontsize=20)
plt.ylim(0, 4.5)

plt.figure()
ef_col = yeardata.groupby('DOY')['Qu', 'GTI45'].sum()
# Aperture area del colector 2.33 m2
ef_col['Ef'] = round(ef_col['Qu'] / (ef_col['GTI45'] * 2.33) * 100)
ef_col['Ef'].plot()
plt.ylabel('Eficiencia diaria (%)', fontsize=24)
plt.xlabel('DOY', fontsize=24)
plt.xticks(fontsize=20)
plt.yticks(fontsize=20)
plt.ylim(0, 70)

return yeardata

```

**Se definen las funciones de cálculo de energía usada por cada uno de los sistemas considerados que devuelven la energía que requiere cada sistema en kWh para poder abastecer la demanda**

Cada función lleva como parámetro de entrada si lleva CSA para así de esta forma tomar en cuenta

a la hora de calcular la energía consumida la temperatura del agua que viene del CSA y no la temperatura del agua de entrada de la red.

Para el calefón la función **calefon** pide como parámetro de entrada la etiqueta energética correspondiente a la eficiencia de acuerdo a la norma UNIT 1157: 2010 3ra revision. De acuerdo a esta se obtienen las máximas pérdidas que el calefón puede tener para ser catalogado con esa eficiencia.

In [ ]:

```
Tsal = 60 # Temp salida

def calefon(base, Efi, colector=False):
    if Efi == 'A':
        EE = 75 # Min para que sea A es 75%
    elif Efi == 'B':
        EE = 68 # Min para que sea B es 68%
    elif Efi == 'C':
        EE = 61 # Min para que sea C es 61%

    Cn = 60 # Min recomendado por UTE es 60 lts
    Qpr = (5.815 * Cn) / EE - 0.05815 * Cn # en kWh/día
    # Se supone eficiencia de conversion de la resistencia = 1

    key = 'Tmains'
    if colector:
        key = 'Temp salida a respaldo'

    base['Econs [kWh]'] = Qpr / 24 + (base['Total lts caliente'] * 4.184 *
                                     (Tsal - base[key]) / 3600)

    return base.loc[:, ['DOY', 'MES', 'Hora', 'Econs [kWh]']]
```

Para la bomba de calor en la función **bbacalor** se dimensionaron las pérdidas del equipo de acuerdo a los datos adaptados que se obtuvieron de un fabricante (Bosch donde Qp son 0.74 kWh/día para un delta de 20 a 45 grados) por lo cual se adapta considerando un máximo delta de 18 a 60 grados. Se buscó dimensionarlo utilizando la norma UNIT 1157: 2010 3ra revisión pero al ser el volumen de estos equipos grande, las pérdidas permitidas aumentan de forma muy significativa y se distancian mucho de lo reportado por los fabricantes. El COP se calcula en base a una ecuación propuesta por Staffell et. al. (2012), donde el COP depende del lift (diferencia entre la Tamb y la Temp del agua dentro del equipo)

In [ ]:

```
def bbacalor(base, colector=False):

    # COP con DT entre Tamb y adentro del calentador
    # 0.74 kWh/dia de 20 a 45 grados
    Qpr = 0.74 / 25 * (60 - 18)
    base['COP'] = (6.81 - 0.121 * (Tsal - base['TAM']) + 0.00063 *
                  (Tsal - base['TAM']) * (Tsal - base['TAM']))

    key = 'Tmains'
    if colector:
        key = 'Temp salida a respaldo'
```

```

base['Econs [kWh]'] = (Qpr / 24 + base['Total lts caliente'] * 4.184 *
                    (Tsal - base[key]) / (base['COP'] * 3600))

return base.loc[:, ['DOY', 'MES', 'Hora', 'Econs [kWh]']]

```

Para los sistemas a gas en las funciones **gas\_almacen** y **gas\_inst** se dimensiona la eficiencia con el mínimo Energy Factor (EF) permitido para que un equipo sea certificado como Energy Star. El EF es una medida de eficiencia global donde se incluyen todas las pérdidas ya que se obtiene al dividir la energía obtenida sobre la utilizada.

In [ ]:

```

def gas_almacen(base, colector=False, EF=0.67):
    # EF tiene en cuenta perdidas ya que es energia util que sale
    # divido el total de energia entregada al calentador
    # EF minimo para que cumpla con certificacion Energy Star 0.67
    # para menores de 208 lts

    key = 'Tmains'
    if colector:
        key = 'Temp salida a respaldo'

    base['Econs [kWh]'] = (base['Total lts caliente'] * 4.184 *
                        (Tsal - base[key]) / (EF * 3600))

    return base.loc[:, ['DOY', 'MES', 'Hora', 'Econs [kWh]']]

```

In [ ]:

```

def gas_inst(base, colector=False, EF=0.9):
    # EF tiene en cuenta perdidas ya que es energia util que sale
    # divido el total de energia entregada al calentador
    # EF minimo para que cumpla con certificacion Energy Star 0.9

    key = 'Tmains'
    if colector:
        key = 'Temp salida a respaldo'

    base['Econs [kWh]'] = (base['Total lts caliente'] * 4.184 *
                        (Tsal - base[key]) / (EF * 3600))

    return base.loc[:, ['DOY', 'MES', 'Hora', 'Econs [kWh]']]

```

## Tarifas de los energéticos para el cálculo del costo mensual de cada alternativa

Para la Tarifa Eléctrica Residencial Doble Horario se define la función **resdoble**, que considera dos precios:

- de 17 a 23 hs el precio de punta
- en el resto del día el precio de llano

In [ ]:

```

def resdoble(df):
    punta = 8.157

```

```

llano = 3.267
df.loc[(df['Hora'] > 16) & (df['Hora'] < 23), 'Precio $/kWh'] = punta
df.loc[df['Hora'] < 17, 'Precio $/kWh'] = llano
df.loc[df['Hora'] == 23, 'Precio $/kWh'] = llano
df['$'] = df['Precio $/kWh'] * df['Econs [kWh]']

return df.groupby(by=['MES'])['$'].agg(np.sum).reset_index()

```

Para la Tarifa Eléctrica Residencial Simple se define la función **ressimple**, que considera tres escalones de precios:

- hasta 100 kWh
- de 101 hasta 600 kWh
- más de 600 kWh Debido a que el cambio de una tecnología a otra va a impactar en los últimos kWh gastados y que de acuerdo al estudio del MIEM del 2006 el gasto de un hogar en calentamiento de agua corresponde al 37% del gasto total de energía eléctrica, es que se calcula el precio del calentamiento de agua utilizando la función **p\_ressim** de la siguiente manera. El consumo de calentamiento de agua es igual al consumo del calentador dividido 0.37 menos el consumo del calentador dividido 0.37 por 0.63. O sea, que sería el consumo total de la casa menos el consumo de todos los usos menos el de calentamiento de agua.

In [ ]:

```

def ressimple(df):
    # Etotal en kWh
    pivot = df.groupby(by=['MES'])['Econs [kWh]'].agg(np.sum).reset_index()
    # Segun UTE 37% de la energia consumida es para calentamient de agua
    for i in range(len(pivot)):
        pivot.loc[i, '$'] = ((p_ressim(pivot.loc[i, 'Econs [kWh]'] / 0.37) -
                               p_ressim(pivot.loc[i, 'Econs [kWh]'] / 0.37 *
                               .63)))

    return pivot.loc[:, ['MES', '$']]

def p_ressim(value):
    hasta100 = 4.881
    hasta600 = 6.121
    mas600 = 7.63

    if value > 600:
        return (value - 600) * mas600 + 100 * hasta100 + 500 * hasta600
    elif value > 100:
        return 100 * hasta100 + (value - 100) * hasta600
    else:
        return value * hasta100

```

Para obtener el precio del calentamiento con gas natural se utiliza la función **gasres** con los precios para Montevideo de la página de Montevideo Gas y su Poder Calorífico. Para el GLP se utiliza la función **supergas** con el precio de la garrafa de 13 kg y su Poder Calorífico.

In [ ]:

```

def gasres(df):

```

```

# Precio por m3 N
precio = 29.98
# 9300 kcal/m3 N
PCI = 9300 * 4.184 / 3600
# PCI en kWh / m3 N
df = df.groupby(by=['MES'])['Econs [kWh]'].agg(np.sum).reset_index()
df['$'] = df['Econs [kWh]'] / PCI * precio

return df.loc[:, ['MES', '$']]

def supergas(df):
# Precio por kg
precio = 43.5
# 11.800 Kcal/kg
PCI = 11800 * 4.184 / 3600
# PCI en kWh / kg
df = df.groupby(by=['MES'])['Econs [kWh]'].agg(np.sum).reset_index()
df['$'] = df['Econs [kWh]'] / PCI * precio

return df.loc[:, ['MES', '$']]

```

**La función `graf` calcula en base a la base de datos que generó `gen_yeardata`, los consumos energéticos y los costos para cada una de las alternativas, con y sin CSA y devuelve 4 gráficas y dos dataframes con totales anuales por alternativa (Energía y Costo)**

Con el perfil anual generado calcula para cada una de las alternativas (Calefón Ef. A (`calefon`), Bomba de calor (`bbacalor`), Gas con almacenamiento (`gas_almacen`), Gas instantáneo (`gas_inst`) y el escenario base (Calefón Ef. B) los consumos día a día energéticos y el costo en pesos mes a mes considerando y sin considerar un CSA. En el caso de los equipos eléctricos calcula los precios utilizando las tarifas Res. Simple (`ressimple`) y Doble horario (`resdobel`) y en el caso de los equipos a gas calcula los precios utilizando las tarifas de gas natural (`gasres`) y de GLP (`supergas`). Genera 5 gráficas:

- Consumo diario de energía de las 4 alternativas con y sin CSA vs Esc. Base
- Consumo mensual de energía de las 4 alternativas con y sin CSA vs Esc. Base
- Costo mensual en pesos de las 4 alternativas con y sin CSA vs Esc. Base considerando todas las tarifas
- Consumo Energético total anual para cada alternativa, con y sin CSA y el porcentaje que representa del Esc. Base
- Costo total anual para cada alternativa con cada tarifa, con y sin CSA y el porcentaje que representa del Esc. Base

Genera 2 archivos csv y devuelve una lista con dos dataframes:

- Consumo Energético total anual para cada alternativa con y sin CSA
- Costo total anual para cada alternativa con cada tarifa con y sin CSA

In [ ]:

```

import pandas as pd
import math
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import style
import matplotlib.ticker as ticker

```

```

import datetime as dt

def anual_comparison(personas=0, graphs=True):
    yeardata = gen_yeardata(personas, graphs)
    for b in range(1, 3):
        for a in range(1, 3):
            if b == 2 and a == 1:
                continue
            key = {1: 'DOY', 2: 'MES'} # parametro a
            key2 = {1: 'Econs [kWh]', 2: '$'} # parametro b
            tit = {1: 'Calefón A ', 2: 'Bomba de calor ', 3: 'Gas con Alm. ',
, 4: 'Gas Inst. '}

            if b == 1:
                es_base = calefon(yeardata, 'B').groupby([key[a]])[key2[b]].
sum().reset_index()
                es_caleA = calefon(yeardata, 'A').groupby([key[a]])[key2[b]]
.sum().reset_index()
                es_caleA_col = calefon(yeardata, 'A', True).groupby([key[a]]
)[key2[b]].sum().reset_index()
                es_bba = bbacalor(yeardata).groupby([key[a]])[key2[b]].sum()
.reset_index()
                es_bba_col = bbacalor(yeardata, True).groupby([key[a]])[key2
[b]].sum().reset_index()
                es_gasal = gas_almacen(yeardata).groupby([key[a]])[key2[b]].
sum().reset_index()
                es_gasal_col = gas_almacen(yeardata, True).groupby([key[a]]
)[key2[b]].sum().reset_index()
                es_gasin = gas_inst(yeardata).groupby([key[a]])[key2[b]].sum
().reset_index()
                es_gasin_col = gas_inst(yeardata, True).groupby([key[a]])[ke
y2[b]].sum().reset_index()
                esc = {1: es_caleA, 2: es_bba, 3: es_gasal, 4: es_gasin}
                esc3 = {1: es_caleA_col, 2: es_bba_col, 3: es_gasal_col,
                        4: es_gasin_col}
                labels = {1: '', 2: '', 3: '', 4: ''}
                ylab = 'Consumo kWh/día'
                if a == 2:
                    ylab = 'Consumo kWh/mes'
                    totalE = {'Esc. Base': es_base[key2[b]].sum(),
                             tit[1]: esc[1][key2[b]].sum(),
                             tit[2]: esc[2][key2[b]].sum(),
                             tit[3]: esc[3][key2[b]].sum(),
                             tit[4]: esc[4][key2[b]].sum(),
                             tit[1] + ' con Col.': esc3[1][key2[b]].sum(),
                             tit[2] + ' con Col.': esc3[2][key2[b]].sum(),
                             tit[3] + ' con Col.': esc3[3][key2[b]].sum(),
                             tit[4] + ' con Col.': esc3[4][key2[b]].sum()}

            else:
                ylab = 'Consumo $/mes'
                tar = {1: ressimple, 2: resdoble, 3: gasres, 4: supergas}
                es_base = ressimple(calefon(yeardata, 'B'))
                es_caleA_rs = tar[1](calefon(yeardata, 'A'))
                es_caleA_rs_col = tar[1](calefon(yeardata, 'A', True))
                es_caleA_dh = tar[2](calefon(yeardata, 'A'))
                es_caleA_dh_col = tar[2](calefon(yeardata, 'A', True))
                es_bba_rs = tar[1](bbacalor(yeardata))
                es_bba_rs_col = tar[1](bbacalor(yeardata, True))

```

```

es_bba_dn = tar[2](bbacalor(yeardata))
es_bba_dh_col = tar[2](bbacalor(yeardata, True))
es_gasal_gn = tar[3](gas_almacen(yeardata))
es_gasal_gn_col = tar[3](gas_almacen(yeardata, True))
es_gasal_glp = tar[4](gas_almacen(yeardata))
es_gasal_glp_col = tar[4](gas_almacen(yeardata, True))
es_gasin_gn = tar[3](gas_inst(yeardata))
es_gasin_gn_col = tar[3](gas_inst(yeardata, True))
es_gasin_glp = tar[4](gas_inst(yeardata))
es_gasin_glp_col = tar[4](gas_inst(yeardata, True))
esc = {1: es_caleA_rs, 2: es_bba_rs, 3: es_gasal_gn,
       4: es_gasin_gn}
esc2 = {1: es_caleA_dh, 2: es_bba_dh, 3: es_gasal_glp,
        4: es_gasin_glp}
esc3 = {1: es_caleA_rs_col, 2: es_bba_rs_col,
        3: es_gasal_gn_col, 4: es_gasin_gn_col}
esc4 = {1: es_caleA_dh_col, 2: es_bba_dh_col,
        3: es_gasal_glp_col, 4: es_gasin_glp_col}
labels = {1: 'Res. Simp.', 2: 'Res. Simp.', 3: 'Gas Nat.',
          4: 'Gas Nat.'}
labels2 = {1: 'Doble Hor.', 2: 'Doble Hor.', 3: 'GLP',
           4: 'GLP'}
totalP = {'Esc. Base': es_base[key2[b]].sum(),
          tit[1] + labels[1]: esc[1][key2[b]].sum(),
          tit[2] + labels[2]: esc[2][key2[b]].sum(),
          tit[3] + labels[3]: esc[3][key2[b]].sum(),
          tit[4] + labels[4]: esc[4][key2[b]].sum(),
          tit[1] + labels2[1]: esc2[1][key2[b]].sum(),
          tit[2] + labels2[2]: esc2[2][key2[b]].sum(),
          tit[3] + labels2[3]: esc2[3][key2[b]].sum(),
          tit[4] + labels2[4]: esc2[4][key2[b]].sum(),
          tit[1] + 'con colect ' + labels[1]: esc3[1][key2[k
].sum(),
          tit[2] + 'con colect ' + labels[2]: esc3[2][key2[k
].sum(),
          tit[3] + 'con colect ' + labels[3]: esc3[3][key2[k
].sum(),
          tit[4] + 'con colect ' + labels[4]: esc3[4][key2[k
].sum(),
          tit[1] + 'con colect ' + labels2[1]: esc4[1][key2[
b]].sum(),
          tit[2] + 'con colect ' + labels2[2]: esc4[2][key2[
b]].sum(),
          tit[3] + 'con colect ' + labels2[3]: esc4[3][key2[
b]].sum(),
          tit[4] + 'con colect ' + labels2[4]: esc4[4][key2[
b]].sum()}

if graphs:
    plt.figure()
    style.use('fivethirtyeight')

    maxy = int(round(es_base[key2[b]].max() * 1.3))
    y = [i for i in range(0, maxy, round(maxy/5))]

    ax1 = plt.subplot(4, 1, 1)
    ax2 = plt.subplot(4, 1, 2)
    ax3 = plt.subplot(4, 1, 3)
    ax4 = plt.subplot(4, 1, 4)

    ax = [1: ax1, 2: ax2, 3: ax3, 4: ax4]

```

```

ax = {1: ax1, 2: ax2, 3: ax3, 4: ax4}
for i in range(1, 5):
    if i == 1:
        ax[i] = plt.subplot(4, 1, 1)
    else:
        ax[i] = plt.subplot(4, 1, i, sharex=ax1)
    plt.plot(es_base[key[a]], es_base[key2[b]],
            label='Esc. Base', color='r', linewidth=1.5)
    plt.plot(esc[i][key[a]], esc[i][key2[b]],
            label=labels[i] + ' sin colector', color='b',
            linewidth=1.5)
    plt.plot(esc3[i][key[a]], esc3[i][key2[b]],
            label=labels[i] + ' con colector',
            color='tab:orange', linewidth=1.5)

    if b == 2:
        plt.plot(esc2[i][key[a]], esc2[i][key2[b]],
                label=labels2[i] + ' sin colector', color='
',
                linewidth=1.5)
        plt.plot(esc4[i][key[a]], esc4[i][key2[b]],
                label=labels2[i] + ' con colector',
                color='tab:gray', linewidth=1.5)
        plt.fill_between(es_base[key[a]], es_base[key2[b]],
                        esc2[i][key2[b]],
                        where=(es_base[key2[b]] > esc2[i][l
y2[b]]),
                        color='g', alpha=0.2)
        plt.fill_between(es_base[key[a]], esc2[i][key2[b]],
                        es_base[key2[b]],
                        where=(es_base[key2[b]] < esc2[i][l
y2[b]]),
                        color='y', alpha=0.2)

        plt.fill_between(es_base[key[a]], es_base[key2[b]],
                        esc[i][key2[b]],
                        where=(es_base[key2[b]] > esc[i][key2[k
l]),
                        color='g', alpha=0.2)
        plt.fill_between(es_base[key[a]], esc[i][key2[b]],
                        es_base[key2[b]],
                        where=(es_base[key2[b]] < esc[i][key2[k
l]),
                        color='y', alpha=0.2)

    if i == 3:
        plt.ylabel(ylab, fontsize=24)
        plt.yticks(y, fontsize=20)
        plt.ylim(-maxy*0.03, maxy)
        plt.legend(fontsize=10, loc=2)
        plt.setp(ax[i].get_xticklabels(), visible=False)
        plt.grid(True)
        plt.title('Esc. ' + tit[i], fontsize=28, color='c')
    if i == 4:
        plt.setp(ax[i].get_xticklabels(), visible=True)
        x = [i for i in range(1, 13)]
        plt.xlabel("Mes del año", fontsize=24)
        if a == 1:
            x = [i for i in range(15, 366, 15)]
            x.insert(0, 1)
            plt.xlabel("día del año", fontsize=24)
        plt.xticks(x, fontsize=20)

```

```

plt.subplots_adjust(hspace=0.15)

ordenadaE = pd.DataFrame(totalE, index=['kWh/año']).transpose().sort_val
ues(by='kWh/año', ascending=False)
ordenadaP = pd.DataFrame(totalP,
index=['$/año']).transpose().sort_values(by='$/año', ascending=False)

if graphs:
    plt.figure()
    ax = plt.subplot(1, 1, 1)
    plt.title('Consumo calentamiento de agua caliente anual',
              fontsize=28, color='c')
    plt.barh(range(len(ordenadaE)), ordenadaE.iloc[:, 0],
align='center')
    plt.yticks(range(len(ordenadaE)), ordenadaE.index, fontsize=20)
    plt.xlabel('kWh / año', fontsize=24)
    plt.xticks(fontsize=20)
    ax.set_axisbelow(True)
    plt.grid(False, axis='y')
    porc = [int((i / ordenadaE.at['Esc. Base', 'kWh/año']) * 100)
              for i in ordenadaE.values]
    labels = [str(i) + '% del Esc. Base' for i in porc]
    rects = ax.patches
    # esp = 0.3 * rects[-1].get_width()
    for rect, label in zip(rects, labels):
        width = rect.get_width()
        ax.text(width * 0.8, rect.get_y(), label, ha='center', va='bottc
m',
                fontsize=20, color='r', weight='bold')
        # rect.get_y() + rect.get_height()/2

    plt.figure()
    ax = plt.subplot(1, 1, 1)
    plt.title('Costo calentamiento de agua caliente anual',
              fontsize=28, color='c')
    plt.barh(range(len(ordenadaP)), ordenadaP.iloc[:, 0],
align='center')
    plt.yticks(range(len(ordenadaP)), ordenadaP.index, fontsize=20)
    plt.xlabel('miles de $ / año', fontsize=24)
    plt.xticks(fontsize=20)
    ax.set_axisbelow(True)
    plt.grid(False, axis='y')
    porc = [int((i / ordenadaP.at['Esc. Base', '$/año']) * 100)
              for i in ordenadaP.values]
    labels = [str(i) + '% del Esc. Base' for i in porc]
    rects = ax.patches
    # esp = 0.35 * rects[-1].get_width()
    for rect, label in zip(rects, labels):
        width = rect.get_width()
        ax.text(width * 0.9, rect.get_y(), label, ha='center', va='bottc
m',
                fontsize=18, color='r', weight='bold')

    scale_x = 1000
    ticks_x = ticker.FuncFormatter(lambda x, pos: '{0:g}'.format(x/scale
_x))
    ax.xaxis.set_major_formatter(ticks_x)
    plt.subplots_adjust(left=0.18)

```

```

ordenadaP.index.name = 'Sistema'
ordenadaE.index.name = 'Sistema'
ordenadaP = ordenadaP.round(0)
ordenadaE = ordenadaE.round(0)

hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
ordenadaE.to_csv(r'generated_csvs\Consumo anual Energia ' + hoy +
'.csv')
ordenadaP.to_csv(r'generated_csvs\Costo anual ' + hoy + '.csv')

return [ordenadaE, ordenadaP]

```

**La función `**economia**` calcula en base a los precios totales anuales el Período de Repago Simple, la Tasa Interna de Retorno y el Valor Presente neto para cada una de las alternativas con y sin colector solar teniendo en cuenta el costo de inversión de los equipos y el mantenimiento.**

Genera dos graficas:

- una con los resultados del Payback y el IRR de cada alternativa
- una con los resultados del NPV de cada alternativa Y genera un archivo csv con toda la información.

In [ ]:

```

def economia(personas=0):
    anual_comp = anual_comparison(personas)

    npv_rate = 0.1
    inv = {'cal': 8369, 'bomba': 34800, 'G_al': 15600, 'G_in': 17703,
          'Col': 49590}
    # Mant Esc. Base es 0
    mant = {'cal': 0, 'bomba': 1000, 'G_al': 2020, 'G_in': 2020, 'Col': 1000
}

    df = anual_comp[1].copy()
    df['Ahorro'] = df.loc['Esc. Base', '$/año'] - df['$/año']
    df.reset_index(inplace=True)

    df = df.loc[df['Sistema'] != 'Esc. Base', :]
    zipped = zip(['Inv', 'Mant'], [inv, mant])
    for i, j in zipped:
        df.loc[:, i] = 0
        df.loc[df['Sistema'].str.contains('Calefón'), i] = j['cal']
        df.loc[df['Sistema'].str.contains('Bomba'), i] = j['bomba']
        df.loc[df['Sistema'].str.contains('Alm'), i] = j['G_al']
        df.loc[df['Sistema'].str.contains('Inst'), i] = j['G_in']
        df.loc[df['Sistema'].str.contains('con cole'), i] += j['Col']

    df['PRS'] = round((df['Inv'] / (df['Ahorro'] - df['Mant'])), 1)
    for k in range(1, len(df)+1):
        # 10 anos se toma como vida util
        flujo = [(df.loc[k, 'Ahorro'] - df.loc[k, 'Mant'])
                for i in range(10 + 1)]
        flujo[0] = -df.loc[k, 'Inv']
        df.loc[k, 'IRR'] = round(np.irr(flujo) * 100, 0)
        df.loc[k, 'NPV'] = round(np.npv(npv_rate, flujo), 0)

```

```

df.set_index('Sistema', inplace=True)
df.sort_values('PRS', inplace=True)

hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
df.to_csv(r'generated_csvs\Resultados economicos ' + hoy + '.csv')

plt.figure()
ax1 = plt.subplot(121)
plt.barh(range(len(df)), df['PRS'], align='center')
plt.yticks(range(len(df)), df.index, fontsize=20)
plt.xlabel('años', fontsize=24)
plt.xticks(fontsize=20)
ax1.set_axisbelow(True)
plt.grid(False, axis='y')
plt.title('Payback Simple', fontsize=28, color='c')
rects = ax1.patches
# esp = 0.35 * rects[-1].get_width()
for rect, label in zip(rects, df.PRS):
    width = rect.get_width()
    ax1.text(width * 0.8, rect.get_y(), label, ha='center', va='bottom',
             fontsize=18, color='w', weight='bold')

ax2 = plt.subplot(122, sharey=ax1)
plt.barh(range(len(df)), df['IRR'], align='center', color='r')
plt.xlabel('%', fontsize=24)
plt.xticks(fontsize=20)
ax2.set_axisbelow(True)
plt.grid(False, axis='y')
plt.setp(ax2.get_yticklabels(), visible=False)
plt.title('Tasa Interna de Retorno', fontsize=28, color='c')
rects = ax2.patches
for rect, label in zip(rects, df.IRR.astype(int)):
    width = rect.get_width()
    ax2.text(width * 0.8, rect.get_y(), label, ha='center', va='bottom',
             fontsize=18, color='w', weight='bold')

plt.subplots_adjust(wspace=0, left=0.18)

plt.figure()
ax = plt.subplot(111)
ord_NPV = df.NPV.sort_values(ascending=False).astype(int)
plt.barh(range(len(ord_NPV)), ord_NPV, align='center')
plt.yticks(range(len(ord_NPV)), ord_NPV.index, fontsize=20)
plt.xlabel('miles de $', fontsize=24)
plt.xticks(fontsize=20)
ax1.set_axisbelow(True)
plt.grid(False, axis='y')
plt.title('NPV', fontsize=28, color='c')
rects = ax1.patches
# esp = 0.35 * rects[-1].get_width()
#=====
#
#     for rect, label in zip(rects, ord_NPV):
#         width = rect.get_width()
#         ax.text(width * 0.8, rect.get_y(), label, ha='center',
# va='bottom',
#                 fontsize=18, color='r', weight='bold')
#
#=====
#

```

```

scale_x = 1000
ticks_x = ticker.FuncFormatter(lambda x, pos: '{0:g}'.format(x/scale_x))
ax.xaxis.set_major_formatter(ticks_x)

return df

```

La función **variabilidad** corre 500 veces la función **graf** y retiene los valores anuales para cada alternativa con y sin CSA de Energía y costo para luego evaluar la variabilidad del generador de eventos al devolver la desviación estandar como % del promedio.

Genera 2 archivos csv, los resultados de cada corrida y la descripción donde se puede encontrar promedio y desviación estandar de cada una de las alternativas con y sin colector con las distintas tarifas de los energéticos.

In [ ]:

```

def variabilidad(runs):
    it = [3 for i in range(runs)]

    for i in range(len(it)):
        if i == 0:
            corr = anual_comparision(it[i], False)
            resE = corr[0]
            resE.rename(columns={'kWh/año': 'kWh/año ' + str(it[i]) + ' pers
'}, inplace=True)
            resP = corr[1]
            resP.rename(columns={'$/año': '$/año ' + str(it[i]) + ' pers'},
inplace=True)
        else:
            corr = anual_comparision(it[i], False)
            dfE = corr[0]
            dfE.rename(columns={'kWh/año': 'kWh/año ' + str(it[i]) + ' pers'
}, inplace=True)
            resE = pd.concat([resE, dfE], axis=1)
            dfP = corr[1]
            dfP.rename(columns={'$/año': '$/año ' + str(it[i]) + ' pers'}, i
nplace=True)
            resP = pd.concat([resP, dfP], axis=1)

    res = pd.concat([resE, resP], axis=1)
    res = res.T
    hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
    res.to_csv(r'generated_csvs\Resultados variabilidad ' + hoy + '.csv')
    descE = resE.T.describe()
    descP = resP.T.describe()
    desc = pd.concat([descE, descP], axis=1)
    desc.to_csv(r'generated_csvs\Describe ' + hoy + '.csv')
    varE = descE.T[['mean', 'std']]
    varE['std%'] = round(varE['std'] / varE['mean'] * 100, 2)
    varP = descP.T[['mean', 'std']]
    varP['std%'] = round(varP['std'] / varP['mean'] * 100, 2)

    return [varE, varP]

```

La función **var\_integrantes** corre la funcion **graf** para 1, 2, 3, 4 y 5 integrantes

## integrantes

Genera una gráfica de barras apiladas para ver como aumenta el consumo energético al aumentar la cantidad de integrantes y genera un csv con los valores

In [ ]:

```
def var_integrantes():
    # consumos para 1,2,3,4 y 5 personas
    it = [i for i in range(1, 6)]

    for i in range(len(it)):
        if i == 0:
            corr = anual_comparison(it[i], False)
            resE = corr[0]
            resE.rename(columns={'kWh/año': 'kWh/año ' + str(it[i]) + ' pers'}, inplace=True)
            resP = corr[1]
            resP.rename(columns={'$/año': '$/año ' + str(it[i]) + ' pers'}, inplace=True)
        else:
            corr = anual_comparison(it[i], False)
            dfE = corr[0]
            dfE.rename(columns={'kWh/año': 'kWh/año ' + str(it[i]) + ' pers'}, inplace=True)
            resE = pd.concat([resE, dfE], axis=1)
            dfP = corr[1]
            dfP.rename(columns={'$/año': '$/año ' + str(it[i]) + ' pers'}, inplace=True)
            resP = pd.concat([resP, dfP], axis=1)

    res = pd.concat([resE, resP], axis=1)
    res = res.T

    hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
    res.to_csv(r'generated_csvs\Resultados distintos integ ' + hoy + '.csv')

    resE.loc[:, 'Tot'] = resE.sum(axis=1)
    resE.sort_values('Tot', ascending=False, inplace=True)
    resE.drop('Tot', axis=1, inplace=True)

    resE.plot.barh(stacked=True)
    plt.grid(False, axis='y')
    plt.xlabel('kWh/año')

    return res
```

La función **var\_consumo** corre la función **graf** para un hogar de 3 personas donde se suponen tienen distintos perfiles de consumo.

Los consumos son -50, -25, +25 y +50% de los proemdio. Genera una gráfica de barras apiladas para ver como varia el consumo energético al variar los perfiles de consumo y genera un csv con los valores

In [ ]:

```
def var_consumo():
```

```

# 3 integrantes pero con consumos de -50% a +50%
it = [3 * i / 100 for i in range(50, 160, 25)]
labels = {it[0]: '-50 %', it[1]: '-25 %', it[2]: 'promedio',
          it[3]: '+25 %', it[4]: '+50 %'}
for i in range(len(it)):
    if i == 0:
        corr = anual_comparision(it[i], False)
        resE = corr[0]
        resE.rename(columns={'kWh/año': 'kWh/año ' + str(labels[it[i]])})
    , inplace=True)
        resP = corr[1]
        resP.rename(columns={'$/año': '$/año ' + str(labels[it[i]])}), in
place=True)
    else:
        corr = anual_comparision(it[i], False)
        dfE = corr[0]
        dfE.rename(columns={'kWh/año': 'kWh/año ' + str(labels[it[i]])}),
inplace=True)
        resE = pd.concat([resE, dfE], axis=1)
        dfP = corr[1]
        dfP.rename(columns={'$/año': '$/año ' + str(labels[it[i]])}), in
place=True)
        resP = pd.concat([resP, dfP], axis=1)

    res = pd.concat([resE, resP], axis=1)
    res = res.T

    hoy = dt.date.today().strftime("%d-%m-%y")
    res.to_csv(r'generated_csvs\Resultados distintos consumos ' + hoy + '.c
sv')

    resE.loc[:, 'Tot'] = resE.sum(axis=1)
    resE.sort_values('Tot', ascending=False, inplace=True)
    resE.drop('Tot', axis=1, inplace=True)

    resE.plot.barh(stacked=True)
    plt.grid(False, axis='y')
    plt.xlabel('kWh/año')

    return res

```

In [ ]: